

Zur mechanisch orientierten Plastizität
spongiöser Knochen
verschiedener Skeletabschnitte

Eine vergleichende Strukturanalyse

von

Günther Lauer

aus

Coburg

1980

1981 # 180



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Pathologischen Institut
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. Volker Becker

Zur mechanisch orientierten Plastizität
spongiöser Knochen
verschiedener Skeletabschnitte
Eine vergleichende Strukturanalyse

INAUGURAL - DISSERTATION
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Günther Lauer
aus
Coburg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. W. Kersten
Referent: Prof. Dr. H.-J. Pesch
Korreferent: Prof. Dr. V. Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.1980

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. <u>Einleitung und Problemstellung</u>	1
2. <u>Material und Methode</u>	3
3. <u>Ergebnisse</u>	
3.1. Termini	5
3.2. Alters- und Geschlechts- abhängigkeit	6
3.3. Spongiosastruktur	
3.3.1. volumetrische Dichte	6
3.3.2. Oberflächendichte	8
3.3.3. spezifische Oberfläche	9
3.4. Regressions-Korrelations-Analysen	
3.4.1. der Strukturparameter und des Alters	10
3.4.2. der Strukturparameter unter- einander	11
3.4.3. der Strukturparameter der ein- zelnen Knochen	12
4. <u>Diskussion</u>	
4.1. Geschlechts- und Alters- abhängigkeit	14
4.2. Spongiosastruktur, Mechanik und Altersverhalten	
4.2.1. 3. und 5. Lendenwirbelkörper	16

4.2.2.	Femurkopf, Femurhals, distales Femurende und Calcaneus	20
4.2.3.	Beckenkamm	31
4.2.4.	Sternum	35
4.2.5.	Kalotte	36
4.3.	Vergleich der einzelnen Knochen	38
4.4.	Schlußfolgerungen	41
5.	<u>Bildteil</u>	
5.1.	Tabellen	46
5.2.	Abbildungen	55
6.	<u>Zusammenfassung</u>	72
7.	<u>Literaturverzeichnis</u>	76
8.	<u>Lebenslauf</u>	88

E i n l e i t u n g

Zur Beurteilung der Spongiosa des Menschen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

Mit dem "diagnostischen" Röntgenbild (KROKOWSKI, 1968) lassen sich alle Knochen des Körpers komplett erfassen. Veränderungen der Schattendichte oder Spongiosastruktur sind an Hand weitgehend subjektiver Auswertungskriterien erst ab einem Mineral-salzverlust von 30 - 50 % erkennbar (HEUCK und SCHMIDT, 1960; KRIESTER, 1968; STRÜTER und RASSOW, 1969; HEUCK, 1970; BENEKE, 1975; KROKOWSKI, 1975).

Strahlendensitometrische Methoden (KROKOWSKI, 1959 und 1968; BÖRNER et al., 1969; STRÜTER und RASSOW, 1969; GEBHARDT und ZWICKER, 1970; ZWICKER und GEBHARDT, 1974; NAGEL et al., 1974; RASSOW et al., 1976) liefern zwar exakte quantitative Aussagen, sie umfassen jedoch nur einen kleinen Meßbereich; bei Knochen mit inhomogener Spongiosastruktur kann so einerseits durch Zufälligkeiten bei der Meßortwahl das Ergebnis verfälscht werden (PESCH et al., 1979), andererseits können durch die gleichzeitige Messung spongiosaarmer und spongiosareicher Areale Summationseffekte auftreten.

Solche Summationseffekte werden bei der quantitativen Morphometrie (WAGNER, 1965; MERZ, 1967; MERZ und SCHENK, 1970a; DELLING, 1973 und 1974) von Knochenbiopsiezylindern vermieden; allerdings sind die Proben verständlicherweise kleinvolumig und lassen sich nur von wenigen Skeletabschnitten gewinnen (JOWSEY, 1977b). Ihre vollständige Ausmessung mit Integrationsokularen ist außerordentlich zeitaufwendig.

Durch die Entwicklung automatischer Bildanalyzesysteme, die Ergebnisse gleicher Genauigkeit (MEUNIER et al., 1973) aber in angemessener Zeit liefern, und neuer präparativer Techniken für die radiologische Strukturanalyse (ZEUS und PESCH, 1974; PESCH et al., 1975 und 1977) wurde auch von großflächigen Knochenpräparaten eine vollständige und exakte Auswertung frei von Summationseffekten möglich.

Quantitativ morphometrische Untersuchungen erfolgen mit Hilfe der Parameter volumetrische Dichte, Oberflächendichte und spezifische Oberfläche (DELESSE, 1866; HENNIG, 1956 und 1958; BLASCHKE, 1967; ELIAS, 1967; UNDERWOOD, 1970).

Untersucht wurden alters- und geschlechtsabhängige Veränderungen der Spongiosastruktur von Knochen unterschiedlicher funktioneller Belastung des Kopf-, Stamm- und Extremitätenskelets.

M a t e r i a l u n d M e t h o d e

Untersucht wurde die Spongiosa von der Hinterhauptschuppe der Schädelkalotte, Manubrium sterni, 3. und 5. Lendenwirbelkörper (LWK), Beckenkamm, Femurkopf, Femurhals, distalem Femurende und Calcaneus (jeweils rechts) von 130 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 18 - 93 Jahren ohne erkennbare primäre oder sekundäre Knochenerkrankungen (Tab. 1). Das distale Femurende wurde erst später in die Untersuchung einbezogen, so daß hier nur 55 Präparate ausgewertet werden konnten.

Von Scheiben aus dem mittleren Bereich der Knochen wurden nach Fixierung und Einbettung in Methylmethacrylat 100 μ dicke Knochengroßflächenschliffe angefertigt und anschließend kontrastreiche Röntgenbilder hergestellt (ausführliche methodische Darstellung: PESCH et al., 1975 und 1977). Die Schnitte wurden bei 3. und 5. LWK, Femurkopf, Femurhals und distalem Femurende in die Frontalebene, beim Sternum und Calcaneus in die Sagittalebene gelegt. Das coxale Femurende wurde entlang der Crista intertrochantERICA, das distale Femurende oberhalb der Femurcondylen vom Femurschaft abgesetzt. Die Beckenkammscheibe stammt aus dem Bereich der Crista iliaca, aus dem typischerweise Beckenkammbiopsien entnommen werden (JOWSEY, 1977b).

Die Röntgenbilder wurden mittels der Makroeinrichtung des Leitz-Textur-Analyse-Systems ausgewertet

(SERRA, 1973). Als Meßfeld diente jeweils die Fläche des - unter Ausschluß der Kortikalis - maximal einschreibbaren Rechtecks (Abb. 1 a-c); lediglich im Femurkopf wurde die Fläche des maximal einschreibbaren Kreises gewählt (Abb. 1 d).

Auf einer Rechenanlage⁺ wurden mit Hilfe des Statistikprogrammpakets SPSS (BEUTEL et al., 1978) Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Strukturparameter volumetrische Dichte (Vv), Oberflächendichte (Sv) und spezifische Oberfläche (S/V) (DELESSE, 1866; HENNIG, 1956 und 1958; BLASCHKE, 1967; ELIAS, 1967; UNDERWOOD, 1970) der verschiedenen Skeletabschnitte in 6 Altersklassen (Tab. 1) berechnet und Varianzanalysen bezüglich der Einflußgrößen Alter und Geschlecht durchgeführt. Zur weiteren statistischen Auswertung wurde mit varianzanalytischen Methoden (u.a. "lineare Kontraste" nach SCHEFFE) der Einfluß von Alter und Geschlecht auf die Variablen Vv, Sv und S/V in den Altersgruppen unter und ab 50 Jahre untersucht. Durch Regressions-Korrelations-Analysen wurde einerseits der Zusammenhang zwischen den drei Strukturparametern innerhalb eines jeden Knochens und ihre Abhängigkeit vom Alter überprüft (zusätzlich erfolgte auch hier eine Aufspaltung in die Altersgruppen unter und über 50 Jahre), andererseits wurde die Beziehung zwischen den Vv-, Sv- und S/V-Werten der einzelnen Knochen untereinander untersucht.⁺⁺

⁺ Dreifachprozessor TR 440 (Computergesellschaft Konstanz) des regionalen Rechenzentrums der Universität Erlangen-Nürnberg

⁺⁺ Für die Hilfe bei der statistischen Auswertung danke ich Herrn Diplommathematiker H. Seibold aus dem Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Erlangen-Nürnberg (Direktor: Prof. Dr. L. Horbach)

Ergebnisse

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse sollen einige Termini kurz erläutert werden.

Die v o l u m e t r i s c h e D i c h t e (V_v) [%] entspricht dem prozentualen Anteil des Bälkchenvolumens am Gesamtvolumen der Spongiosa (Knochen- und Markraum). Als relative Größe ist sie unabhängig von der untersuchten Fläche. Sie ist ein Maß für die Knochenmenge der Spongiosa.

Die O b e r f l ä c h e n d i c h t e (S_v) [mm^2/cm^3] mißt die Grenzfläche zwischen Knochen und Knochenmark pro Volumeneinheit. Sie ist ein Maß für die Trabekeloberfläche.

Die s p e z i f i s c h e O b e r f l ä c h e (S/V) [mm^2/mm^3] ist definiert als Quotient aus Bälkchenoberfläche und Bälkchenvolumen. Ihre Größe ist damit abhängig vom mittleren Bälkchendurchmesser: hohe Werte sind gleichbedeutend mit einem geringen, niedrige Werte mit einem großen mittleren Bälkchendurchmesser.

Als B e l a s t u n g werden die von außen auf einen Körper einwirkenden Kräfte, als B e a n s p r u c h u n g die durch diese Kräfte im Material eines Körpers hervorgerufenen Spannungen bezeichnet. Damit ist die Beanspruchung eines Knochens das entscheidende Kriterium für seine Frakturgefährdung.

Der V a r i a t i o n s k o e f f i z i e n t (V) [%] gibt die Standardabweichung als Prozentsatz des zugehörigen Mittelwertes wider ($V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \%$). Er ist damit ein Maß für die relative Schwankungsbreite von Meßwerten um ihren Mittelwert.

Die Varianzanalysen zeigten für alle Knochen - außer der Kalotte - bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % eine signifikante Abhängigkeit zwischen der volumetrischen Dichte bzw. der Oberflächendichte und dem Alter auf.

Eine signifikante geschlechtsspezifische Abhängigkeit der volumetrischen Dichte oder Oberflächendichte konnte dagegen weder für die Altersgruppen unter und ab 50 Jahre noch für die Gesamtgruppe nachgewiesen werden.

Für die weiteren Untersuchungen wurden deshalb und aus Gründen der Vergleichbarkeit zu früheren Arbeiten (PESCH et al., 1977 und 1980; SCHARF et al., 1980) 6 Altersklassen ohne Berücksichtigung des Geschlechts gebildet (Tab. 1).

Die volumetrische Dichte aller untersuchten Knochen ist bereits in der Altersklasse bis 29 Jahre verschieden (Tab. 2, Abb. 2a): die Kalotte hat mit 65 % die weitaus größte Spongiosamasse; die Vv-Werte der anderen Knochen nehmen vom Femurkopf mit 32,6 %, über Beckenkamm mit 30,4 %, Femurhals mit 27,8 %, Calcaneus mit 26,6 %, distales Femurende mit 24,0 %, LWK III mit 23,1 % und LWK V mit 22,9 % bis zum Sternum mit 19,9 % gleichmäßig ab.

Die Spongiosamasse der Kalotte verändert sich während des Lebens nicht (Abb. 3).

Die volumetrische Dichte des Femurkopfes reduziert sich insgesamt um etwa einünftel ihres Ausgangswertes, wobei die Abnahme nach dem 60. Lebensjahr

fast viermal so stark ist wie in den vorausgegangenen Jahren.

Die Spongiosadichte des Beckenkamms bleibt bis zum 50. Lebensjahr konstant, in den folgenden Jahren verringert sie sich um etwas über ein Viertel ihres Anfangswertes.

Der Femurhals verliert als einziger Knochen schon vor dem 50. Lebensjahr über ein Fünftel seiner Spongiosamasse; die verbleibende Knochenmasse wird in den folgenden Jahren nochmals um mehr als ein Fünftel reduziert.

Die volumetrische Dichte des Calcaneus verringert sich im Zeitraum der 6 Altersklassen gleichmäßig um etwas über ein Sechstel ihres ursprünglichen Wertes.

Auch die Spongiosadichte des distalen Femurendes nimmt gleichmäßig um insgesamt ein Fünftel des Ausgangswertes ab, wenn auch - bedingt durch die geringere Fallzahl - die Mittelwerte stärker schwanken.

Die Lendenwirbelkörper verlieren bis zum 50. Lebensjahr nur wenig von ihrer Knochenmasse; in den folgenden Jahren wird ihre volumetrische Dichte um knapp ein Drittel ihres Ausgangswertes reduziert.

Auch bei der volumetrischen Dichte des Sternum setzt die starke Abnahme ($\frac{2}{5}$ des Ausgangswertes) erst nach dem 50. Lebensjahr ein.

Die Standardabweichung der Mittelwerte der volumetrischen Dichte ist bei der Kalotte am größten; bei den anderen Knochen ist sie annähernd gleich. Innerhalb der einzelnen Knochen nimmt sie mit steigendem Alter ab (Tab. 2).

Die Variationskoeffizienten der volumetrischen Dichte sind beim Femurkopf und beim Beckenkamm in der Altersklasse bis 29 Jahre auffallend hoch; das Sternum hat in fast allen Altersklassen hohe Variationskoeffizienten.

Die Werte der O b e r f l ä c h e n d i c h t e der einzelnen Knochen stehen in der Altersklasse bis 29 Jahre in einem ähnlichen Verhältnis zueinander wie die entsprechenden Werte der volumetrischen Dichte (Tab. 2, Abb. 2b).

Die Kalotte ($3630 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) hat die größte Spongiosa-oberfläche. Allerdings ist der Abstand zu den Oberflächendichten der anderen Knochen nicht so groß wie bei der volumetrischen Dichte. Auch die Oberflächendichte der Kalotte bleibt während des Lebens unverändert (Abb. 3).

Die Oberflächendichte des Femurkopfes ($3040 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) ist dagegen vor dem 50. Lebensjahr niedriger als die des Beckenkamms. Sie verringert sich über alle Altersklassen gleichmäßig um etwas weniger als ein Siebtel ihres Ausgangswertes.

Die Oberflächendichte des Beckenkamms ($3184 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) nimmt bis zum 50. Lebensjahr nur um 5 % ab, dann erfolgt ein starker Abfall bis auf $3/4$ ihres Ausgangswertes. Sie sinkt damit in den höheren Altersklassen unter die Werte des Femurkopfs und Calcaneus.

Der Femurhals ($2703 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) hat die zweitniedrigste Oberfläche der untersuchten Knochen. Bereits vor dem 50. Lebensjahr fällt sie um 18 % ihres Anfangswertes ab, in den folgenden Jahren verliert sie davon weitere 18 %.

Die Oberflächendichte des Calcaneus ($2904 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) verringert sich vor dem 50. Lebensjahr um knapp 14 %, während sie dann nur noch um etwa 2 % zurückgeht.

Auch die Oberflächendichte des distalen Femurendes ($2869 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) nimmt vor dem 50. Lebensjahr stärker (rund 18 %) ab als in den folgenden Jahren (rund 5 %).

3. LWK ($2740 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), 5. LWK ($2706 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) und Sternum ($2696 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) haben zusammen mit dem Femurhals die niedrigsten Werte der Oberflächendichte.

Die Abnahme der Spongiosaoberfläche ist bei den Lendenwirbelkörpern und dem Sternum nach dem 50. Lebensjahr mehr als doppelt so groß wie davor.

Insgesamt verringert sich die Oberflächendichte des 3. LWK um 37 %, des 5. LWK um 32 % und des Sternum um 39 %.

Die Variationskoeffizienten der Oberflächendichte sind bei den einzelnen Knochen annähernd gleich (Tab. 2); lediglich ihre Werte für das Sternum liegen etwas höher.

Der Vergleich der Werte der s p e z i f i s c h e n O b e r f l ä c h e der untersuchten Skeletabschnitte in den verschiedenen Altersklassen ergibt ein anderes Bild als der Vergleich der volumetrischen Dichte oder Oberflächendichte (Tab. 2, Abb. 2c).

In der Altersklasse bis 29 Jahre bilden die S/V-Werte der Kalotte und des Sternum mit $5,8 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ bzw. $14,5 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ die beiden Extrema. Dazwischen liegen die S/V-Werte von Femurkopf und Femurhals mit ungefähr $9 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$, Beckenkamm und Calcaneus mit $11 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ sowie 3. bzw. 5. LWK und distalem Femurende mit etwa $12 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$.

Wie die volumetrische Dichte und Oberflächendichte bleibt auch die spezifische Oberfläche der Kalotte während des Lebens unverändert.

Die spezifische Oberfläche des Femurhalses nimmt über alle Altersklassen gleichmäßig um 10 % ihres Anfangswertes zu.

Beim Beckenkamm steigt die spezifische Oberfläche ab dem 30. Lebensjahr gleichmäßig um 12 % an.

Die spezifische Oberfläche der Lendenwirbelkörper und des Femurkopfes weist ab dem 50. Lebensjahr eine leichte Zunahme auf, die allerdings innerhalb der Standardabweichung der Mittelwerte liegt.

Die S/V-Werte von Calcaneus, distalem Femurende und Sternum lassen keine Altersveränderungen erkennen.

Der Variationskoeffizient der spezifischen Oberfläche liegt bei der Kalotte etwas höher als bei den anderen Knochen. Dort weist er jeweils in der Altersklasse unter 30 Jahren einen höheren Wert auf als in den folgenden.

Die R e g r e s s i o n s - K o r r e l a t i o n s -
A n a l y s e n ergaben bei der Kalotte keinen Zusammenhang zwischen der volumetrischen Dichte und dem Alter (Abb. 4a). Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Vv-Werten der übrigen Knochen und dem Alter sind negativ und überschreiten nicht den Wert von $r = 0.56$ (Tab. 3, Abb. 4b). Auffallend ist die geringe Altersabhängigkeit des Calcaneus ($r = 0.29$) (Abb. 4c). Die Korrelationskoeffizienten in den

beiden Altersgruppen unter und ab 50 Jahre liegen unter denen der Gesamtgruppe.

Die Absolutbeträge der Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der Oberflächendichte und dem Alter liegen - im Vergleich zur volumetrischen Dichte - etwas höher (Tab. 3, Abb. 5). Die Oberflächendichte der Kalotte zeigt keine Altersabhängigkeit ($|r| \leq 0.1$). Auch die Korrelationskoeffizienten zwischen der Oberflächendichte des Calcaneus und dem Alter sind niedrig ($|r| \leq -0.32$ in der Altersgruppe bis 50 Jahre). Bei den anderen Knochen sind die Korrelationskoeffizienten in den Altersgruppen bis 50 Jahre und ab 50 Jahre kleiner als in der Gesamtgruppe.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen der spezifischen Oberfläche und dem Alter liegen unter $r = 0.37$ (Tab. 3, Abb. 6). Auch die Aufteilung in die beiden Altersgruppen unter und ab 50 Jahre hat keine höheren Korrelationskoeffizienten zur Folge.

Die Korrelationen der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte ergaben negative Korrelationskoeffizienten bei der Kalotte ($r = -0.59$) (Abb. 7a), positive bei allen anderen Knochen ($0.79 \leq r \leq 0.89$) (Abb. 7b und c); lediglich im Femurkopf tritt mit $r = 0.53$ ein deutlich niedrigerer Wert auf (Tab. 4). Bei der Aufteilung in die Altersgruppen unter und ab 50 Jahre ändern sich die Korrelationskoeffizienten nicht wesentlich.

Spezifische Oberfläche und volumetrische Dichte der verschiedenen Skeletabschnitte korrelieren negativ ($-0.60 \geq r \geq -0.95$) (Tab. 4, Abb. 8). Auch hier

weichen die Korrelationskoeffizienten der Altersgruppen unter und ab 50 Jahre nur gering von den Korrelationskoeffizienten der Gesamtgruppe ab.

Oberflächendichte und spezifische Oberfläche der Kalotte korrelieren positiv miteinander ($r = 0.74$). Beim Calcaneus und Femurkopf zeigen die beiden Werte keinen linearen Zusammenhang ($|r| \leq 0.04$). Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Sv- und S/V-Werten der anderen Knochen liegen zwischen $r = -0.21$ und $r = -0.56$ (Tab. 4, Abb. 9). Beim Sternum und Beckenkamm sind sie in der Altersgruppe unter 50 Jahre etwas größer als in der Gesamtgruppe.

Korreliert man die Werte der volumetrischen Dichte der verschiedenen Skeletabschnitte miteinander, so erhält man durchgehend positive Korrelationskoeffizienten, die nicht den Wert von $r = 0.62$ überschreiten (Tab. 5a). Die volumetrische Dichte der Kalotte weist zu der der anderen Knochen nur eine geringe lineare Beziehung auf ($r \leq 0.27$) (Abb. 10a). Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Vv-Werten der Knochen des Stammskelets (Sternum, Beckenkamm und 3. und 5. LWK) (Abb. 10b und c) sowie zwischen den Vv-Werten der Femurabschnitte (Abb. 10d und e) liegen etwas höher als die Korrelationskoeffizienten der anderen möglichen Kombinationen (Abb. 10f).

Auch die Werte der Oberflächendichte der Kalotte zeigen nur einen geringen Zusammenhang zu denen der anderen Skeletabschnitte auf ($r \leq 0.2$) (Tab. 5b). Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Sv-Werten der übrigen Knochen liegen höher als die Korrelationskoeffizienten zwischen den entsprechenden

Vv-Werten. Auch bezüglich der Oberflächendichte ist der Zusammenhang zwischen den Knochen des Stammskelets bzw. zwischen den Femurabschnitten etwas besser (Abb. 11a - c)

Korreliert man die Werte der spezifischen Oberfläche der verschiedenen Knochen miteinander, erhält man Korrelationskoeffizienten, die mit $r \approx 0.56$ deutlich unter denen der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte liegen (Tab. 6). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen verwischen (Abb. 12 a und b).

D i s k u s s i o n

In die vorliegende Untersuchung wurden nur Knochen von Verstorbenen ohne erkennbare primäre oder sekundäre Knochenerkrankungen einbezogen. Weitere Auswahlkriterien wurden nicht angewandt. Insbesondere wurde auf eine Berücksichtigung des Trainingszustandes der Patienten verzichtet, da die verfügbaren Daten über Beruf, körperliche Leistungsfähigkeit, Körpergewicht, Krankheitsdauer oder Liegezeit sich einer exakten Beurteilung entzogen.

Bei der statistischen Auswertung ließen sich - in Übereinstimmung mit früheren Arbeiten (PESCH et al., 1977 und 1980; SCHARF et al., 1980) - in keiner Altersklasse strukturanalytische Unterschiede zwischen den Knochen von männlichen oder weiblichen Verstorbenen feststellen. Zu demselben Ergebnis kamen SISSONS et al. (1967) bei Spongiosaflächenmessungen an Beckenkammschliffen. Andere Autoren fanden bei Festigkeitsprüfungen (WEAVER und CHALMERS, 1966; CHALMERS, 1973; NOKSO-KOIVISTO et al., 1976), radiologischen Untersuchungen (CALDWELL und COLLINS, 1961; THIEMANN, 1966; KROKOWSKI, 1971b; KROKOWSKI und FRICKE, 1975), Volumenmessungen (DEQUEKER et al., 1971; MEUNIER et al., 1973) oder bei der Beurteilung der Spongiosabälkchen (ATKINSON, 1967; EGER et al., 1967; WAKAMATSU und SISSONS, 1969; SINGH et al., 1972) unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Knochenmasse bzw. Knochenstruktur und Geschlecht:

CALDWELL und COLLINS (1961) und NOKSO-KOIVISTO et al. (1976) beobachteten bei Männern in allen Altersklassen einen höheren Calciumgehalt bzw. eine größere Festigkeit der Knochen als bei Frauen. MORGAN und NEWTON-JOHN (1969), KROKOWSKI (1971b), NEWTON-JOHN und MORGAN (1970), DAMBACHER et al. (1971) und CHALMERS (1975) teilen mit, daß Frauen eine geringere Knochenmasse haben und relativ mehr Knochen verlieren als Männer. Nach KROKOWSKI und FRICKE (1975) setzt bei Frauen der Knochenverlust 10 Jahre früher ein als bei Männern. Signifikante Altersveränderungen der volumetrischen Dichte fanden DEQUEKER et al. (1971) nur bei Frauen. WAKAMATSU und SISSONS (1969) beobachteten bei Frauen eine geringere Bälkchendicke als bei Männern; sie nimmt nur bei Männern mit zunehmendem Alter signifikant ab, dagegen steigt der Trabekelabstand nur bei Frauen signifikant an. THIEMANN (1966), WEAVER und CHALMERS (1966), EGER et al. (1967), SINGH et al. (1972) und MEUNIER et al. (1973) stellten Geschlechtsunterschiede erst während oder nach der 5. Dekade fest.

SCHENK und MERZ (1969), MERZ und SCHENK (1970a) und DELLING (1973 und 1974), die vergleichbare Strukturuntersuchungen an der Spongiosa des Beckenkammes durchführten, machen keine Mitteilungen über Geschlechtsunterschiede.

Ein signifikanter Zusammenhang (Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %) zwischen der volumetrischen Dichte bzw. der Oberflächendichte und dem Alter ließ sich mit varianzanalytischen Tests für alle Skeletabschnitte - außer der Kalotte - nachweisen.

3. und 5. LWK unterscheiden sich in ihren Strukturparametern nur wenig (PESCH et al., 1977 und 1980): volumetrische Dichte und Oberflächendichte sind klein, nur das Sternum bzw. nur der Femurhals und das Sternum haben niedrigere Vv- oder Sv-Werte. Bis zum 50. Lebensjahr verändern sich Spongiosamasse und Spongiosaoberfläche der Wirbelkörper nur geringfügig, dann erfolgt eine Abnahme um ungefähr ein Drittel.

Entsprechend den niedrigen Werten der volumetrischen Dichte und Oberflächendichte ist die spezifische Oberfläche der beiden LWK als reziprokes Maß des mittleren Bälkchendurchmessers relativ hoch. Die Bälkchen der Wirbelkörper und des distalen Femurendes haben annähernd die gleiche Stärke, nur die Bälkchen des Sternum sind dünner. Die spezifische Oberfläche des 3. und 5. LWK verändert sich während des Lebens nicht.

Die gefundenen Werte der drei Strukturparameter und ihre Veränderungen im Laufe des Lebens weisen eine gute Übereinstimmung mit anderen Strukturanalysen der Wirbelkörper auf (PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980), die nach der gleichen Methodik durchgeführt wurde. Die etwas höheren Werte in einer früheren Untersuchung (PESCH et al., 1977) erklären sich aus der inzwischen durchgeführten neuen Justierung des Textur-Analyse-Systems; die Aussagemöglichkeiten über relative Veränderungen werden dadurch nicht betroffen.

EGGER et al. (1967) fanden mit dem Integrationsokular I von Zeiss an Methacrylatschliffen des 1. LWK eine volumetrische Dichte von knapp 19 % (Alters-

klasse: 26 - 35 Jahre), die im Laufe des Lebens um fast die Hälfte abnimmt. DUNNILL et al. (1967) beobachteten an entkalkten Schnitten des 2. LWK bis zum 50. Lebensjahr einen konstanten Vv-Wert von rund 25 %, der in den folgenden Jahren nur um ein Sechstel absinkt. Die Diskrepanz zwischen den beiden Arbeiten einerseits und dieser Untersuchung andererseits läßt sich einmal darauf zurückführen, daß EGER nur einen "repräsentativen Ausschnitt" des Wirbelkörperschliffes untersuchte und so auf Grund der Inhomogenität der Wirbelkörperspongiosa (JUNGHANNS, 1939; DIETRICH, 1956; SCHLÜTER, 1965; ARNOLD et al., 1966; ATKINSON, 1967; RASSOW et al., 1976; PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980) niedrigere Werte erhielt; zum Zweiten hat DUNNILL die gesamte Querschnittsfläche einschließlich der Kortikalis ausgemessen, was die ziemlich geringe Abnahme der Knochenmasse erklärt.

CALDWELL und COLLINS (1961) und CHALMERS (1973) beobachteten bei densitometrischen Untersuchungen bzw. Festigkeitsmessungen eine Abnahme des Calciumgehaltes bzw. der Druckfestigkeit der Wirbelkörper ebenfalls erst nach dem 50. Lebensjahr.

Die Wirbelkörper tragen das auf ihnen lastende Körpergewicht. Ein straffer Bandapparat schränkt ihren Bewegungsumfang zueinander von kranial nach kaudal zunehmend ein (BENNINGHOFF-GOERTTLER, 1975) und verhindert weitgehend Scherbewegungen zwischen ihnen. Die Kraftübertragung erfolgt unter Zwischenschaltung der druckelastischen Bandscheiben in Form einer Flächenpressung (PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980). Auf die Wirbelkörper wirken daher hauptsächlich vertikale Druckkräfte ein. Dieser - im Vergleich

zu durch biegende Kräfte bewirkten - geringen Beanspruchung (s.u.) entspricht die niedrige Spongiosadichte und der kleine mittlere Bälkchendurchmesser.

Die Spongiosastruktur ist den unterschiedlichen Beanspruchungen in den verschiedenen Abschnitten eines Wirbelkörpers angepaßt (KUMMER, 1962; PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980): die dünne Kortikalis der Grund- und Deckplatten als Krafteinleitungsbezirk kann nur eine kurze Strecke frei überspannen; sie wird von engstehenden schlanken Bälkchen unterstützt. Zahlreiche Querverbindungen nehmen die auftretenden Querspannungen auf. Die vertikalen Trabekel im mittleren Bereich der Wirbelkörper dienen der Kraftüberleitung. Durch horizontale Verstrebungen wird ihre freie Knicklänge herabgesetzt und ihre Stabilität erhöht, so daß der geringe Durchmesser der tragenden Bälkchen möglich ist.

Die Spongiosastrukturen des 3. und 5. LWK sind annähernd gleich. Aus der höheren Belastung des 5. LWK resultiert wegen seiner größeren tragenden Spongiosaquerschnittsfläche (PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980) keine Steigerung der Beanspruchung der Einzelbauelemente.

Parallel zur Abnahme der volumetrischen Dichte und Oberflächendichte der LWK nach dem 50. Lebensjahr kommt es zu einem Abfall der Standardabweichungen der Mittelwerte der beiden Parameter. Dies täuscht eine abnehmende Streuung der Meßwerte um die Mittelwerte mit steigendem Alter vor. Drückt man dagegen die Standardabweichung als Prozentsatz des zugehörigen Mittelwertes aus (Variationskoeffizient), so fallen diese Unterschiede weg (NEWTON-JOHN und

MORGAN, 1970), d.h. die relative Schwankungsbreite bleibt in allen Altersklassen gleich.

Die spezifische Oberfläche der Lendenwirbelkörper ändert sich nicht signifikant. Die leichte Zunahme nach dem 50. Lebensjahr liegt innerhalb der Standardabweichung. Die spezifische Oberfläche ist als Verhältnis von Oberfläche zu Volumen definiert. Aus ihrer Konstanz muß man zunächst folgern, daß sich der Durchmesser der Bälkchen während des Lebens nicht ändert. Da aber volumetrische Dichte und Oberflächen-dichte abnehmen, müßte das bedeuten, daß Bälkchen völlig abgebaut werden, ohne daß die übriggebliebenen verändert werden. Da der Prozeß des Altersabbaus der Spongiosa sicher nicht nur an einzelnen Bälkchen diskret ansetzt, muß die Konstanz der spezifischen Oberfläche aus der Überlagerung verschiedener Mechanismen resultieren: parallel zu einer gleichmäßigen Verdünnung aller Bälkchen werden die zur Aufrechterhaltung der Funktion notwendigen Bälkchen verstärkt; das arithmetische Mittel aller Bälkchendurchmesser, das dem Reziprokwert der spezifischen Oberfläche entspricht, bleibt dadurch unverändert.

Dieser Prozeß der "kompensatorischen Hypertrophie" wurde bisher hauptsächlich für die Beckenkamm-spongiosa (s.u.) beschrieben (SCHENK und MERZ, 1969; WAKAMATSU und SISSONS, 1969; MERZ und SCHENK, 1970a; KRUSEKRUSE, 1971; VITALLI, 1970; DELLING, 1973 und 1974; OLAH, 1975).

Der Abbau der Spongiosa wird zuerst am Verlust von Querverstrebungen im mittleren Bereich der Wirbelkörper erkennbar (THIEMANN, 1966; ATKINSON, 1967; UEHLINGER, 1974; TANAKA, 1976; PESCH et al., 1980;

SCHARF et al., 1980). Da mit zunehmendem Abbau die Beanspruchung der übriggebliebenen, tragenden Bälkchen steigt, werden sie im Sinne der kompensatorischen Hypertrophie verstärkt. Die Spongiosastruktur erscheint grobmaschig aufgelockert.

Mikrofrakturen (FROST, 1960) müssen als pathologische Erscheinungen einer Osteoporose gewertet werden.

In den grund- und deckplattennahen Bereichen würde der Abbau von Bälkchen zum Funktionsverlust führen. Hier behält die Spongiosa ihre dichte Struktur bis ins hohe Alter (PESCH et al., 1980; SCHARF et al., 1980).

Die vier untersuchten Abschnitte des Beinskelets - Femurkopf, Femurhals, dist. Femurende und Calcaneus - weisen eine unterschiedliche Spongiosastruktur auf:

Beim jungen Erwachsenen hat der Femurkopf - abgesehen von der Kalotte - die höchste volumetrische Dichte; die Vv-Werte von Femurhals, Calcaneus und distalem Femurende liegen unter denen des Beckenkammes, aber über den Werten der Wirbelkörper und des Sternum. Dagegen ist die Oberflächendichte des Femurkopfes zunächst niedriger als die des Beckenkammes, Calcaneus und distales Femurende haben etwas kleinere Werte, während die Oberflächendichte des Femurhalses noch geringer ist als die der LWK. Femurkopf und Femurhals haben nach der Kalotte die zweitniedrigste spezifische Oberfläche; die S/V-Werte von Calcaneus und distalem Femurende sind jeweils um etwa ein Zehntel größer und entsprechen damit den Werten des Beckenkammes bzw. der LWK.

Femurkopf und distales Femurende verlieren während des Lebens annähernd gleichmäßig etwa ein Fünftel, der Calcaneus nur etwas mehr als ein Sechstel der ursprünglichen Spongiosamasse. Die Spongiosa des Femurhalses unterliegt von allen untersuchten Knochen dem stärksten Abbau: bereits vor dem 50. Lebensjahr nimmt sie um ein Fünftel ab; die verbleibende Spongiosamasse wird in den folgenden Jahren um ein weiteres Fünftel reduziert. Die Oberflächendichte des Femurkopfes verringert sich gleichmäßig um weniger als ein Siebtel. Die Werte der Oberflächendichte von distalem Femurende und Calcaneus nehmen hauptsächlich vor dem 50. Lebensjahr ab, während die des Femurhalses auch nach diesem Zeitpunkt noch kleiner wird. Die spezifischen Oberflächen von distalem Femurende und Calcaneus bleiben während des Lebens unverändert; beim Femurkopf erfolgt nach dem 50. Lebensjahr ein leichter Anstieg, der jedoch nicht signifikant ist. Dagegen nimmt die spezifische Oberfläche des Femurhalses über alle Altersklassen gleichmäßig um insgesamt 10 % zu.

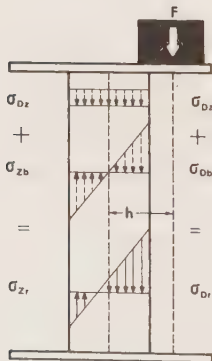
Direkt vergleichbare strukturanalytische Ergebnisse über die Knochen des Beinskelets sind nur aus einer früheren Arbeit (PESCH et al., 1977) verfügbar. Die dort gefundenen Werte der Strukturparameter des Femurhalses weichen - bedingt durch eine andere Schnittebene (s.u.) - erheblich von den Ergebnissen dieser Untersuchung ab.

Über das Konstruktionsprinzip und die mechanischen Belastungen und Beanspruchungen der unteren Extremität liegen viele verschiedenartige Untersuchungen

und Berechnungen vor (BRAUNE und FISCHER, 1895; FISCHER, 1899; PAUWELS, 1965, 1973, 1974 und 1976; KNESE, 1958; KUMMER, 1959 und 1962; KNIEF, 1966; CATEL, 1970; ACKERMAN et al., 1972; MÜLLER, 1975; MAQUET, 1976).

Da das Schwerelot des Körpers während keiner Phase des Stehens oder Gehens mit der mechanischen Achse des Beines zusammenfällt (PAUWELS, 1965 und 1973; MAQUET, 1976), wirkt die Kraft des Körpergewichtes unter einem Hebelarm (Abstand der mechanischen Achse des Beines zum Schwerpunktslot) biegend auf die Knochen des Beines ein.

In einem exzentrisch belasteten Körper treten auf Grund der überlagerten Biegebeanspruchung wesentlich höhere maximale Spannungen auf als in einem zentrisch belasteten⁺ (PAUWELS, 1965 und 1973).

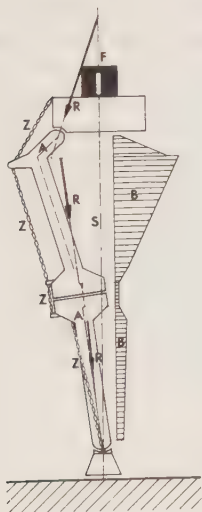


⁺Beanspruchung eines Körpers auf Biegung:

wirkt eine Kraft F unter einem Hebelarm h exzentrisch auf einen Körper ein, so setzen sich die resultierenden Druck- und Zugspannungen (σ_{Dr} und σ_{Zr}) aus den zentrischen Druckspannungen (σ_{Dz}) und den Druck- und Zugspannungen (σ_{Db} und σ_{Zb}) aus der überlagerten reinen Biegebeanspruchung zusammen.
(nach PAUWELS, 1973)

Durch das Prinzip der Zuggurtung⁺ (PAUWELS, 1965) wird die Resultierende aus Muskelkraft und Körpergewichtskraft der mechanischen Achse des Beines angenähert und so der Hebelarm zwischen Beinachse und einwirkender Kraft verkürzt. Dadurch wird - trotz der durch die zusätzliche Zugwirkung der Muskulatur gestiegenen Belastung - die Beanspruchung der Knochen herabgesetzt.

Da Kräfte, die nicht durch das Drehzentrum eines Gelenks verlaufen, eine Bewegung in diesem Gelenk zur Folge haben, muß zur Erhaltung des Gleichgewichtes im Hüft-, Knie- und Sprunggelenk dem Drehmoment der Körpergewichtskraft durch Muskeln und Bänder entgegengewirkt werden. Es treten folglich im Bereich der Drehzentren der Gelenke nur axiale Druckspannungen auf (PAUWELS, 1965); entsprechend findet man hier Beanspruchungsminima.



⁺Prinzip der Zuggurtung am Bein:

- F: Körpergewichtskraft
Z: Zugkräfte von Muskeln und Bändern
R: Resultierende aus F und Z
S: Schwerelot des Körperschwerpunktes
A: mechanische Achse des Beines
B: Beanspruchungsdiagramm des Beines
(nach PAUWELS, 1965)

Auf Grund der Kongruenz von Femurkopf und Hüftgelenkspfanne besteht zwischen beiden weitgehende Formschlüssigkeit. Das Hüftgelenk verfügt so über 3 Freiheitsgrade der Rotation (beidsinnig um die 3 Raumachsen) und über einen Freiheitsgrad der Translation (in Richtung der Achse des Femurhalses), der jedoch unter physiologischen Bedingungen durch Muskelzüge aufgehoben wird (MÜLLER, 1975). Scherbewegungen zwischen den beiden Gelenkanteilen werden damit unmöglich. Zusätzlich wird die Reibung im Hüftgelenk durch die Synovialflüssigkeit herabgesetzt; dabei bleibt die Gleichgewichtsdicke des Schmierfilms stets größer als Null (MÜLLER, 1975), d.h. der Schmierfilm reißt nicht ab und die Gelenkflächen können sich nicht direkt berühren.

Aus Gleichgewichtsgründen muß die resultierende Druckkraft aus der Körpergewichtskraft und der Muskelkraft der Abduktoren durch das Drehzentrum des Femurkopfes verlaufen (s.o.); wegen seiner kugelförmigen Gestalt steht sie immer senkrecht auf seiner Peripherie (PAUWELS, 1973). Entsprechend werden die auftretenden Druckspannungen von radiär verlaufenden, engstehenden Trabekeln aufgenommen, die im gesamten Femurkopf gleichmäßig querverstrebt sind. Eine Verdichtung der Spongiosastruktur unter der Kortikalis, wie man sie bei den Lendenwirbelkörpern findet, ist hier wegen der geringen Querkkräfte nicht nötig. Vom Krafteinleitungsbezirk unter dem Pfannendach des Hüftgelenks zieht ein breites Band deutlich dickerer Bälkchen durch die Mitte des Femurkopfes zum Adambogen des Femurhalses, das die Druckkraft in den Femurhals überleitet. Diese Struktur wurde bei der Messung nicht gesondert erfaßt.

PAUWELS (1965 und 1973) legte seinen Berechnungen Maße und Gewichte des Mannes zugrunde, an dem BRAUNE und FISCHER (1895) und FISCHER (1899) den Gang des Menschen untersuchten (Körpergewicht von 58.7 kg): die während der Standbeinphase ("Phase 16" (FISCHER, 1899)) auftretenden Druckspannungen betragen 22 kp/cm^2 . Dieser großen Beanspruchung entspricht die hohe volumetrische Dichte der Spongiosa und der große mittlere Bälkchendurchmesser.

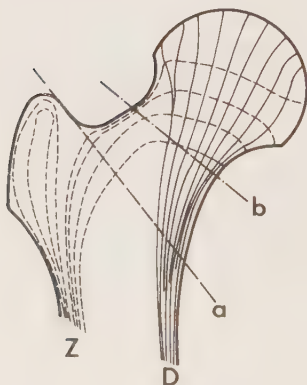
Die oben beschriebene resultierende Druckkraft steht schräg zur Schwerachse des Femurhalses und beansprucht ihn so auf Biegung (PAUWELS, 1973). Mit zunehmendem Abstand vom Femurkopf wird der Hebelarm und damit die biegende Wirkung der Resultierenden größer. Da die tragende Fläche des Femurhalses nur ein Drittel der des Femurkopfes beträgt, erreichen im Modell PAUWELS (1973) die maximalen medialen Druckspannungen Werte von 198 kp/cm^2 - das ist das neunfache der Druckspannungen des Femurkopfes -, die maximalen lateralen Zugspannungen 66 kp/cm^2 . Dem scheint zu widersprechen, daß die spezifischen Oberflächen von Femurkopf und Femurhals gleich und die Oberflächendichte und volumetrische Dichte des Femurhalses sogar kleiner sind als die des Femurkopfes.

Der hier untersuchte Bereich erstreckt sich von der Crista intertrochanterica bis zum Femurkopf: er enthält entsprechend dem quasitrajektoriiellen Verbundbau der Spongiosa (KNESE, 1958) die erforder-

lichen Druck- und Zugbündel⁺, die ein nahezu spannungsfreies Feld, das Ward'sche Dreieck, umschließen.

Man erkennt im Röntgenbild, daß die Bälkchen des Druckbündels dicker sind als die des Zugbündels. Erstere verdichten sich mit zunehmendem Abstand vom Femurkopf immer weiter und nehmen schließlich im Trajektorium rectum mediale (CATEL, 1970) einen kompaktaähnlichen Aufbau an. Zwischen den beiden Trabelkzügen bestehen zahlreiche dünne Querverbindungen, die auch das Ward'sche Dreieck durchziehen. Aus dem Summationseffekt der gleichzeitigen Messung dieser Bälkchengruppen mit verschiedenem Querschnitt resultieren die relativ niedrigen Werte der volumetrischen Dichte und der geringe mittlere Bälkchendurchmesser.

Dies erklärt auch die Diskrepanz zu dem Ergebnis einer früheren Untersuchung (PESCH et al., 1977): dort wurde der Schnitt senkrecht zur Achse des Femurhalses in den Bereich gelegt, wo die dicken Bälkchen



+Trajektorien im coxalen
Femurende:

D: Druckbündel

Z: Zugbündel

a: Begrenzungslinie des
Meßbereichs der vor-
liegenden Untersuchung

b: Projektion der Untersuchungsebene von PESCH et al. (1977)

(nach PAUWELS, 1973)

des Druck- und Zugbündels unmittelbar nebeneinander liegen (s.o.). Volumetrische Dichte und Bälkchendurchmesser sind dementsprechend fast doppelt so groß wie in der vorliegenden Untersuchung.

Im Gegensatz zum Hüftgelenk sind die knöchernen Anteile des Kniegelenks einander nur wenig angepaßt. Trotzdem ist die "Schmiegun" zwischen Femurkondylen und Tibiaplatte infolge der Meniski, die eine "Preßfederverbindung" zwischen Ober- und Unterschenkel schaffen, besser als zwischen Femurkopf und Hüftgelenkspfanne (MÜLLER, 1975). Der Kraftschluß zwischen beiden Gelenkteilen erfolgt durch die Kreuz- und Seitenbänder. Die Femurkondylen besitzen eine spirallige, nach hinten zunehmende Krümmung. Dadurch findet bei der Kniebeugung eine kontinuierliche Verlagerung des augenblicklichen Drehpunktes statt, so daß das Kniegelenk eine polyzentrische Rotation ausführt (MÜLLER, 1975). Die Resultierende aller auf das Kniegelenk einwirkenden Kräfte muß im Gleichgewichtszustand in jeder Beugestellung durch das entsprechende Drehzentrum laufen.

Nach den Berechnungen MAQUETS (1976), die ebenfalls auf den Arbeiten von BRAUNE und FISCHER (1895) und FISCHER (1899) beruhen, schwankt die Beanspruchung des Kniegelenks während der verschiedenen Phasen des Gehens erheblich: der Maximalwert von 19.8 kp/cm^2 wird beim Aufsetzen des Schwungbeines erreicht, wenn der Fuß des anderen Beines vom Boden abhebt (Phase 12 (FISCHER, 1899)); ein Beanspruchungsminimum (2.8 kp/cm^2) wird durchlaufen, wenn sich Körperschwerpunkt und Kniegelenk in der Frontalebene befinden (Phase 17).

Die Belastung des distalen Femurendes durch die Druckkraft der Patella wird vor allem beim statischen Beugen des Knies groß; während des Gehens spielt sie für die Beanspruchung des distalen Femurendes nur eine untergeordnete Rolle.

Die Spongiosa in der Untersuchungsebene (Frontalebene) muß die Druckspannungen während der Standbeinphase aufnehmen. Sie weist einen ähnlichen Aufbau wie die Spongiosa der LWK auf: vertikale Trabekel leiten die Kraft von der Kompakta des Femurschaftes auf die Gelenkflächen über; durch Querverstreungen wird ihre Stabilität erhöht. In Höhe der beiden Epikondylen ist die regelmäßige Spongiosastruktur unterbrochen; hier münden die Bälkchen ein, die der Kraftüberleitung bei gebeugtem Knie dienen. Unter der Kortikalis der Gelenkflächen verdichtet sich die Spongiosa. Auch hier muß die dünne Knochenplatte der Femurkondylen durch viele, engstehende Bälkchen unterstützt werden. Die zahlreichen Querverstreungen wirken den Scherkräften entgegen, die beim Gleiten der Femurkondylen auf dem Tibiaplateau während der Beugung auftreten.

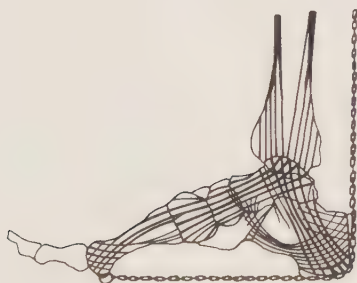
Trotz der kurzen hohen Beanspruchung beim Aufsetzen des Beines liegen die Spannungen im distalen Femurende deutlich unter denen im Femurkopf. Dem entsprechen die relativ niedrige volumetrische Dichte und der geringe mittlere Bälkchendurchmesser. Das distale Femurende gleicht in seinen Strukturparametern eher den beiden LWK.

Der Fuß stellt nach BENNINGHOFF-GOERTTLER (1975) einen zweiarmigen Hebel dar. Der Calcaneus bildet dabei den kurzen Hebelarm, an dem als kräftigster

Muskel der Fußsenker der M. triceps surae über die Achillessehne ansetzt. Weiter dient das Fersenbein zusammen mit dem Großzehenballen als Auflagerungspunkt für den die Hauptlast des Körpergewichts tragenden medialen Längsbogen des Fußes. Da der Fuß nicht die statischen Eigenschaften einer Gewölbekonstruktion besitzt (v. LANZ-WACHSMUTH, 1972), werden die Einzelbausteine zur Aufnahme des Seitschubes durch Muskeln und Bänder aktiv und passiv längsverspannt.

Der Calcaneus ist während der verschiedenen Phasen des Gehens wechselnden Belastungen ausgesetzt: beim Aufsetzen des Beines wirkt vor allem die Druckkraft des Körpergewichtes auf ihn ein, während kurz vor dem Abheben des Fußes die Zugkräfte des M. triceps surae und der Längsverspannung der Fußbögen überwiegen.

Der Trabekelverlauf⁺ entspricht diesen Belastungen: vom talo-calcanealen Gelenk ziehen Bälkchen schräg abwärts, die die aus der tragenden Aufgabe des Calcaneus resultierenden Druckspannungen aufnehmen. Im Bereich des Tuber calcanei bildet ein anderer Bälkchenzug einen Bogen parallel zur Kortikalis, der der Kraft-



⁺Spongiosaarchitektur
des Fußskeletes

Achillessehne und
Plantaraponeurose
als Zugurtungen
eingetragen

(nach BENNINGHOFF-
GOERTTLER, 1975)

umlenkung von der Achillessehne auf die Längsspannung des Fußes dient. Zwischen diesen Hauptzügen bestehen zahlreiche, stabilisierende Querverbindungen.

Durch das unter der Ferse fast 2 cm dicke Sohlenpolster findet eine gleichmäßige Verteilung des Auflagedruckes statt (BENNINGHOFF-GOERTTLER, 1975), so daß - trotz der hohen Belastung - die auftretenden Spannungen relativ niedrig sind. Der Calcaneus liegt daher mit seiner volumetrischen Dichte und spezifischen Oberfläche zwischen den Werten der Knochen mit hoher Beanspruchung - wie Femurkopf oder Femurhals - und den Werten der Knochen mit niedriger Beanspruchung - wie Lendenwirbelkörper oder Femurkondylen.

Der Abbau der Bälkchen außerhalb der Druck- und Zuglinien (UEHLINGER, 1974) bildet das morphologische Substrat der Abnahme der volumetrischen Dichte und Oberflächendichte der Spongiosa der vier Abschnitte des Beinskelets.

Im Femurkopf und Calcaneus kommt es vor allem zu einem Verlust der oben beschriebenen Querverstrebungen, während im distalen Femurende zusätzlich die vertikalen Bälkchen im zentralen Bereich abgebaut werden; die Markhöhle schiebt sich dort förmlich gegen die Kniegelenksflächen vor. Im Femurhals bildet sich zuerst das Ward'sche Dreieck als nahezu spongiosafreies Areal aus (UEHLINGER, 1967; SINGH et al, 1970), dann kommt es zu einem Abbau der dünnen Querverbindungen zwischen Druck- und Zugbündel.

Die weitgehende Konstanz der spezifischen Oberfläche von Femurkopf, distalem Femurende und Calcaneus zeigt, daß in diesen Knochen der Abbau von Bälkchen durch

eine Verstärkung der funktionell notwendigen Strukturen im Sinne der kompensatorischen Hypertrophie ausgeglichen wird.

Grundsätzlich andere Verhältnisse liegen dagegen im Femurhals vor: die spezifische Oberfläche nimmt um insgesamt 10 % zu. In der oben erwähnten früheren Untersuchung (PESCH et al., 1977) beträgt die Zunahme sogar 19 %. Dieser Unterschied erklärt sich wieder aus der dort gewählten Untersuchungsebene: sie enthält die Bälkchen des Druck- und Zugbündels, die nur wenig querverstrebt sind. Der Abbau dieser Querverstrebungen steigert die Beanspruchung der tragenden Bälkchen nur unwesentlich. Damit fehlt der notwendige mechanische Reiz zur kompensatorischen Hypertrophie. Da die Bälkchen des Druck- und Zugbündels funktionell gleichwertig sind, werden sie gleichmäßig dünner, der mittlere Bälkchendurchmesser nimmt ab. Im Längsschnitt des Femurhalses wird der Abstand zwischen Druck- und Zugbündel nach distal größer. Die Querverstrebungen in diesem Bereich unterliegen dem Prozeß der kompensatorischen Hypertrophie. Aus der gleichzeitigen Erfassung der verschiedenen Bälkchengruppen resultiert die relativ geringe Zunahme der spezifischen Oberfläche des Femurhalses in der vorliegenden Untersuchung.

Die Spongiosa des Beckenkammes hat in allen Altersklassen von den untersuchten Skeletabschnitten die dritthöchste volumetrische Dichte. Sie bleibt bis zum 50. Lebensjahr annähernd konstant, um dann um

etwas über ein Viertel abzunehmen. Bis zum 50. Lebensjahr weist nur die Kalotte eine höhere Oberflächendichte als der Beckenkamm auf. In den folgenden Jahren fallen seine Werte unter die des Femurkopfes und Calcaneus. Die spezifische Oberfläche des Beckenkammes liegt zwischen den Werten von Femurkopf und Calcaneus. Sie steigt ab dem 30. Lebensjahr kontinuierlich um insgesamt 12 % an. Ihr Wert bis zum 30. Lebensjahr liegt sehr hoch; da er aber eine hohe Standardabweichung aufweist, widerspricht er nicht einer gleichmäßigen Zunahme der spezifischen Oberfläche während des Lebens.

Über die Spongiosa des Beckenkammes liegen vor allem auf Grund der Einführung der Beckenkammbiopsie in die klinische Routine viele Arbeiten vor: die Bestimmung der volumetrischen Dichte mit Hilfe von Integrationsokularen (EGER et al., 1967; MERZ und SCHENK, 1970a; ELLIS und PEART, 1972; DELLING, 1973 und 1974) oder automatischen Bildanalysesystemen (MEUNIER et al., 1973) ergab in der Altersklasse bis 29 Jahre Werte zwischen 20.4 % und 23.5 %, die deutlich unter den Ergebnissen dieser Untersuchung liegen. Dies beruht darauf, daß dort Schliffe oder Schnitte mit einer Dicke von 4 - 8 μ , hier Schliffe von 100 μ Dicke untersucht wurden. Die Spongiosa des Beckenkammes ist nach EGER et al. (1967) netzförmig aufgebaut, so daß man bei sehr dünnen Schnitten mehr "Löcher" zwischen den Bälkchenmaschen erfaßt. Dadurch sinkt in der Untersuchungsebene der Knochenanteil - und damit die volumetrische Dichte. Bleibt man mit einer Schliffstärke von 100 μ knapp unter dem mittleren Bälkchendurchmesser von 140 μ (WAKAMATSU

und SISSONS, 1969), so fällt dieser Effekt weg, ohne daß Summationseffekte auftreten (ZEUS und PESCH, 1974).

DEQUEKER et al. (1971) erhielten bei der Bestimmung der volumetrischen Dichte mit Hilfe des archimedischen Prinzips Werte, die mit 14.85 % bei Männern und 17.83 % bei Frauen noch tiefer lagen.

MERZ und SCHENK (1970a), ELLIS und PEART (1972) und DELLING (1973 und 1974) beobachteten einen Abfall der volumetrischen Dichte ebenfalls erst nach dem 50. Lebensjahr.

DEQUEKER (1971) fand nur bei Frauen eine signifikante Abnahme.

Die relative Verminderung der volumetrischen Dichte zeigt unter Berücksichtigung der Streuung der Einzelwerte eine gute Übereinstimmung zwischen dieser Untersuchung und den Ergebnissen von MERZ und SCHENK (1970a), ELLIS und PEART (1972) und DELLING (1973 und 1974).

Die spezifische Oberfläche der Beckenkammspongiosa wurde nur noch von MERZ und SCHENK (1970a) und DELLING (1973 und 1974) bestimmt. Sie fanden keine altersabhängigen Veränderungen. DELLING (1974) führt die Konstanz von S/V auf die gegenläufigen Prozesse der Abnahme der Knochenmasse und der kompensatorischen Zunahme des Bälkchendurchmessers zurück. MERZ und SCHENK (1970a) beobachteten nach dem 50. Lebensjahr eine starke Streuung der Werte: der Bälkchendurchmesser eines Teils der Fälle nimmt nach diesem Zeitpunkt kontinuierlich ab, während in der annähernd gleichen Anzahl von Fällen sich der Bälkchendurchmesser vergrößert. Aus der gleichzeitigen Erfassung der beiden Gruppen resultiert die "scheinbare Konstanz" der spezifischen Oberfläche.

Die Darmbeinschaukeln sind nach BENNINGHOFF-GOERTTLER (1975) Rahmenkonstruktionen mit verstärkten Rändern und verdünnter Mitte. Die umspannten Felder dienen als Ansatzstellen der großen Muskelmassen, die für den aufrechten Gang erforderlich sind. Der untersuchte Ausschnitt stammt aus der vorderen Tragsäule des Rahmens. Er liegt im weitgehend konstanten Zugspannungsfeld der umgebenden Muskulatur (WAGNER, 1965).

Da die Spongiosa des Beckenkammes eine hohe volumetrische Dichte bei einem im Vergleich dazu niedrigen Bälkchendurchmesser aufweist, muß sie aus vielen, relativ dünnen Bälkchen aufgebaut sein. Die Spongiosabälkchen verlaufen spitzbogenartig und schneiden sich unter einem rechten Winkel. Nach KUMMER (1962) und PAUWELS (1965 und 1973) ist dieses Spongiosamuster für eine Biegebeanspruchung durch eine außerhalb des Säulenkerns gelegene Kraft mit Querschubkomponente charakteristisch.

Durch die gleichmäßige Spongiosastruktur kann dem vielseitigen Kräftespiel der am Becken ansetzenden Muskelgruppen während des Stehens und Gehens Widerstand geleistet werden. Die Spongiosa des Beckenkammes weist damit keine ausgesprochenen Sicherungsstrukturen auf. Es kann hier nicht zum Abbau ganzer Bälkchengruppen kommen. Die Spongiosastruktur wird daher mit zunehmendem Alter gleichmäßig ausgelichtet. Dabei bleibt die kompensatorische Verstärkung der stehengebliebenen Trabekel hinter dem Prozeß der allgemeinen Verdünnung zurück.

WAKAMATSU und SISSONS (1969) fanden dementsprechend bei leicht abnehmendem mittleren Bälkchendurchmesser (bei Männern signifikant) in den höchsten Altersgruppen die dicksten Bälkchen.

Das Sternum hat von allen untersuchten Knochen die geringste volumetrische Dichte und Oberflächendichte und die höchste spezifische Oberfläche. Volumetrische Dichte und Oberflächendichte bleiben bis zum 50. Lebensjahr konstant bzw. nehmen nur wenig ab. In den folgenden Altersklassen verringern sie sich um ungefähr 40 % ihres ursprünglichen Wertes. Das Sternum weist damit - bezogen auf die Anfangswerte - die höchste relative Abnahme von Vv und Sv auf. Die spezifische Oberfläche läßt keine Altersabhängigkeit erkennen.

Vergleichsmessungen von WHITEHOUSE (1975) mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen an der Spongiosa des Manubrium sterni eines 27jährigen Mannes ergaben deutlich niedrigere Werte der volumetrischen Dichte und spezifischen Oberfläche, die sich auf die relativ kleinen Meßflächen zurückführen lassen.

Das Manubrium sterni wird nur gering belastet. Von den Schlüsselbeinen und der 1. und 2. Rippe werden keine wesentlichen Druck- oder Zugkräfte auf seine Spongiosa ausgeübt. Zur Aufnahme der auftretenden Spannungen sind nur sehr wenige und sehr dünne Bälkchen notwendig. Im Alter unterliegen diese noch einem starken Abbau, so daß größere spongiosafreie Areale entstehen.

Aussagen über reparative Vorgänge in der Spongiosa des Sternum lassen sich daher nur schlecht machen.

Die Spongiosa der Kalotte hat die höchste volumetrische Dichte und Oberflächendichte und die niedrigste spezifische Oberfläche, d.h. sie hat die dichteste Struktur und die dicksten Bälkchen aller untersuchten Knochen.

Als einziger Knochen weist die Kalotte keine Veränderungen ihrer Spongiosastrukturparameter im Alter auf. Dies stimmt mit konventionellen Röntgenbefunden überein (THIEMANN, 1966).

Der Urknochen des Neugeborenen wird unter der Zugwirkung des intrakraniellen Druckes und des wachsenden Gehirns (THOMA, 1911; SEYSS, 1970) durch perikraniellen und duralen Anbau in den lamellären, primären Knochen des Kleinkindes umgebaut (DOMINOK, 1959/60). Im Laufe des Lebens wird dieser durch sekundären Knochen ersetzt, die Kalotte erhält ihren dreischichtigen Aufbau.

Im Schädeldach treten im Liegen durch den positiven Subarachnoidaldruck Zugspannungen, im Stehen durch den negativen Subarachnoidaldruck Druckspannungen auf. Nach THOMA (1911) haben die tangentialen Materialspannungen für alle Richtungen und für jede Stelle der Kalotte annähernd den gleichen Betrag von 0.3 kp/cm^2 . EHLER et al. (1971) fanden dagegen bei physiologischem Liquordruck lediglich Zugspannungen zwischen 0.02 kp/cm^2 und 0.067 kp/cm^2 über dem Schädeldach.

Die Materialspannungen in der Kalotte betragen damit nur einen Bruchteil der Spannungen in den anderen Knochen. Dort weisen die Spannungen innerhalb der Haupttrajektorien eine bestimmte Richtung auf. Die

Spongiosabälkchen richten sich entsprechend aus, so daß sie - nur axial auf Druck oder Zug beansprucht - die kleinstmögliche Beanspruchung erfahren (PAUWELS, 1965). In der Spongiosa der Kalotte sind die Spannungen in alle Richtungen gleich groß, so daß auf die einzelnen Bälkchen biegende Kräfte einwirken, die eine hohe Beanspruchung mit einem großen Materialbedarf zur Folge haben.

Ein weiterer Unterschied zu den anderen Knochen besteht darin, daß die Kalotte während des ganzen Tages ununterbrochen gleichmäßig auf Druck oder Zug beansprucht wird.

Bei der Beurteilung der Spongiosastruktur der Kalotte muß man außerdem die Schutzfunktion des Schädeldaches für das Gehirn berücksichtigen. Die Diploe spielt als elastizitätssteigernde Verschiebeschicht zwischen Tabula externa und interna für die beträchtliche plastische Verformbarkeit der Kalotte (BENNINGHOFF-GOERTTLER, 1975) eine große Rolle. Sie muß dabei Beanspruchungsspitzen standhalten können, die weit über ihre physiologische Belastung durch den intrakraniellen Druck hinausgehen.

Durch Regressions-Korrelations-Analysen wurde versucht die Gesetzmäßigkeiten des Spongiosastrukturumbaus weiter aufzudecken.

Die Strukturparameter der Kalotte weisen keinen Zusammenhang mit dem Alter auf. Bei den anderen Skeletabschnitten überschreiten die Korrelationskoeffizienten

trotz der durch Varianzanalysen gesicherten signifikanten Abhängigkeit zwischen volumetrischer Dichte bzw. Oberflächendichte und Alter nicht den Betrag von 0.7. Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche und dem Alter ist noch geringer.

Mit dem Korrelationskoeffizienten erfaßt man den linearen Anteil der Beziehung $y = f(x)$ der beiden Parameter x und y . Da bei einigen Skeletabschnitten (wie Sternum, Beckenkamm, Lendenwirbelkörper oder Femurhals) der Spongiosaumbau vor und nach dem 50. Lebensjahr verschieden ist (CHALMERS und WEAVER, 1966; CHALMERS, 1973; WEAVER und CHALMERS, 1966; ATKINSON, 1967; MERZ und SCHENK, 1970a; ELLIS und PEART, 1972; DELLING, 1973 und 1974; MEUNIER et al., 1973; PESCH et al., 1977 und 1980; SCHARF et al., 1980), müßte dort bei einer reinen Altersabhängigkeit der lineare Anteil der Beziehung zwischen den Strukturparametern und dem Alter bei getrennter Beurteilung der beiden Lebensabschnitte höher sein als bei gemeinsamer Beurteilung. Dies ist mit der Methode nicht erkennbar. Im Gegenteil dazu sind die Korrelationskoeffizienten in den beiden Altersgruppen - und dabei vor allem in der Gruppe unter 50 Jahre - kleiner als in der Gesamtgruppe. Die Spongiosastruktur weist also besonders in jungen Jahren große individuelle Unterschiede auf. Das kalendarische Alter kann nicht die ausschließliche Einflußgröße auf ihren Umbau sein.

Auch beim Vergleich der drei Strukturparameter innerhalb eines jeden Knochens zeigt sich die Sonderstellung der Kalotte. Ihre Vv-, Sv- und S/V-Werte weisen einen engen Zusammenhang auf, der nicht durch alters-

abhängige Veränderungen bedingt ist. Volumetrische Dichte und Oberflächendichte korrelieren negativ, d.h. Spongiosamasse und Spongiosaoberfläche verhalten sich gegensinnig. Da auch die volumetrische Dichte und die spezifische Oberfläche negativ, die Oberflächendichte und spezifische Oberfläche dagegen positiv korrelieren, bedeutet das, daß die Festigkeit der Kalottenspongiosa - altersunabhängig - entweder durch wenige dicke oder durch entsprechend mehr dünne Bälkchen erreicht wird. Der mittlere Bälkchendurchmesser liegt aber auch dann noch weit über dem der anderen Knochen.

Dort verhalten sich volumetrische Dichte und Oberflächendichte gleichsinnig. Der altersbedingte Verlust an Spongiosamasse geht also mit einer Abnahme der Oberfläche einher. Die Korrelationskoeffizienten zwischen der spezifischen Oberfläche und der volumetrischen Dichte bzw. Oberflächendichte sind negativ (eine Ausnahme bilden die Sv- und S/V-Werte von Femurkopf und Calcaneus, die keine Abhängigkeit erkennen lassen). Dabei läßt der enge Zusammenhang zwischen spezifischer Oberfläche und volumetrischer Dichte wegen der geringen Altersabhängigkeit der ersteren (s.o.) nicht den Schluß zu, daß mit der altersbedingten Abnahme der Spongiosamasse eine Verringerung des Bälkchendurchmessers einhergeht. Er ist vielmehr Ausdruck der individuellen Reaktionsfähigkeit der Spongiosa: innerhalb gewisser Schwankungsbreiten wird ihre Festigkeit - altersunabhängig - nur durch Vergrößerung oder Verkleinerung des Bälkchenquerschnittes den mechanischen Erfordernissen angepaßt.

Durch die Beurteilung der Korrelationskoeffizienten zwischen den Strukturparametern der verschiedenen Knochen sollte geprüft werden, ob von den Verhältnissen in einzelnen Knochen Rückschlüsse auf das gesamte Skeletsystem gezogen werden können.

Die Kalotte weist dabei weder hinsichtlich ihrer volumetrischen Dichte noch ihrer Oberflächendichte noch ihrer spezifischen Oberfläche einen Zusammenhang mit den anderen Knochen auf.

Deren Strukturparameter korrelieren durchweg positiv miteinander, d.h. der Spongiosaumbau vollzieht sich dort zwar gleichsinnig, die niedrigen Korrelationskoeffizienten zeugen aber von den unterschiedlichen Prinzipien des Strukturumbaus in den einzelnen Skeletabschnitten. Dies zeigt sich besonders deutlich bei den Korrelationen der spezifischen Oberfläche: die Korrelationskoeffizienten überschreiten nicht den Betrag von 0.56.

Die Korrelationskoeffizienten der Oberflächendichte liegen allgemein etwas höher als die der beiden anderen Parameter. Dies liegt darin begründet, daß die Spongiosaoberfläche sowohl bei der kompensatorischen Hypertrophie als auch beim Prozeß der reinen Atrophie (MERZ und SCHENK, 1970a; DELLING, 1973 und 1974) abnimmt. Hinsichtlich der Oberflächendichte verwischen so die Unterschiede zwischen den beiden Reaktionsformen.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Vv- oder Sv-Werten von Knochen zusammengehörender Skeletabschnitte - wie Stammskelet oder Femurabschnitte - liegen etwas über dem allgemeinen Niveau. Die höchsten Werte erreichen dabei die Korrelationskoeffizienten zwischen den in ihrer funktionellen Bedeutung gleichwertigen Lendenwirbelkörpern.

Aus der Beurteilung der Spongiosa einzelner Knochen kann man also nicht auf das gesamte Skeletsystem schließen. Lediglich innerhalb vergleichbarer Skeletabschnitte sind vorsichtige Rückschlüsse auf die Spongiosamasse, nicht aber auf die Spongiosastruktur möglich.

Die Beckenkammbiopsie vermag so brauchbare Aussagen über die Spongiosamasse der Wirbelsäule zu liefern. Die Beurteilung peripherer Knochen - z.B. durch quantitative Röntgenbilder des Calcaneus (BORGKE und HEUCK, 1975) - scheint dazu nicht geeignet.

Auf den Knochen wirken einerseits exogene Faktoren wie Druck- und Zugspannungen (PAUWELS, 1965; VITALLI, 1970) ein, andererseits steht er im Mittelpunkt endogener Regulationssysteme z.B. zur Aufrechterhaltung der Calcium-Phosphat-Homöostase oder des Säuren-Basen-Gleichgewichtes (DELLING, 1973). Veränderungen dieser Einflußgrößen führen zu einer Zu- oder Abnahme der Knochenmasse.

Die Spongiosa des jungen Menschen kann sich veränderten mechanischen Verhältnissen durch die Bildung von neuen Strukturen anpassen, während die Spongiosa des alten Menschen mit einer Verstärkung vorhandener Strukturen reagiert (VITALLI, 1970).

Die komplexe Spongiosastruktur des jungen Erwachsenen ist somit einerseits bedingt durch die ständige Anpassung an die sich ändernden statischen Verhältnisse des heranwachsenden Skelets - so ist z.B. die Bean-

spruchung des Femurhalses auf Biegung beim Kleinkind wegen des größeren Collo-Diaphysen-Winkels (v. LANZ-WACHSMUTH, 1972) wesentlich geringer als beim Erwachsenen -, andererseits nützen das Kind und der Jugendliche - begünstigt durch die noch hochelastischen Bänder und Gelenkkapseln - in Spiel und Sport die Bewegungsmöglichkeiten ihrer Gelenke voll aus. Der Knochen ist vielseitigen Belastungen ausgesetzt und entwickelt eine Spongiosa mit vielen Sicherungsstrukturen.

Die Qualität der Beanspruchung der Spongiosa im Sinne der hauptsächlich auftretenden Druck- und Zugspannungen und ihrer Trajektorien ändert sich während des Lebens nicht. Dagegen nimmt die Intensität der Beanspruchung mit fortschreitendem Alter ab. Die Bewegungsumfänge stellen sich auf jenes Maß ein, das gewohnheitsgemäß gebraucht wird (BENNINGHOFF-GOERTTLER, 1975), die Anforderungen an Halte- und Stützleistungen des Skelets reduzieren sich (SCHLEGEL, 1978).

Die allgemeine Beanspruchungsminderung wird durch direkte mechanische Einflüsse modifiziert. Diese wirken sich auf periphere Knochen stärker aus als auf zentrale (KROKOWSKI, 1971; KROKOWSKI und FRICKE, 1975). Der regional unterschiedliche Knochenabbau spiegelt das wider: die Spongiosamassen der zentralen Knochen Sternum, Beckenkamm und Lendenwirbelkörper werden trotz verschiedener funktioneller Bedeutung und trotz unterschiedlicher Spongiosamassen in der Jugend um den gleichen Betrag abgebaut.

Dagegen sind die Verhältnisse der peripheren Knochen der unteren Extremität uneinheitlich: der Calcaneus verliert sehr wenig, Femurkopf und distales Femurende

verlieren etwas mehr Spongiosamasse; die Spongiosa des Femurhalses weist von allen untersuchten Knochen den stärksten Abbau auf.

Die Unterschiede im Altersverhalten der Beinskeletabschnitte resultieren aus den Bewegungs- und Haltungsformen des alten Menschen: der Calcaneus wird während des Gehens und Stehens beim gesunden Menschen im Alter weitgehend in derselben Weise beansprucht wie in der Jugend. Seine Spongiosa unterliegt dadurch einem ständigen Training, das dem allgemeinen Knochenabbau entgegenwirkt. Der Einfluß "des Alters" auf sie ist somit nur gering. Durch die Einschränkungen des Bewegungsumfanges in Hüft- und Kniegelenk mit dem entsprechenden Verlust an Sicherungsstrukturen (s.o.) tritt im Femurkopf und distalen Femurende ein etwas stärkerer Spongiosaabbau ein, der aber immer noch unter dem der zentralen Knochen liegt. Durch den frühzeitigen Verzicht vieler Menschen auf Bewegungen, die über das "normale" Stehen und Gehen hinausreichen, werden im Femurnals nur noch die Hauptstrukturen des Druck- und Zugbündels beansprucht. Der daraus resultierende weitgehende Abbau der Querverstrebungen schlägt sich in der starken Abnahme der volumetrischen Dichte nieder. Der Femurhals wird dadurch anfällig für außergewöhnliche Belastungen: ein Sturz auf die Seite oder ein "Vertreten" des Beines führt, da die zur Aufnahme der auftretenden Kräfte erforderlichen Spongiosastrukturen fehlen (OTTO et al., 1969), zur Schenkelhalsfraktur. Der Femurhals zählt so zu den typischen, frakturgefährdeten Altersknochen (JESSERER, 1978).

Die mechanischen Einflüsse auf die Kalotte ändern sich während des Lebens nicht. Ihre Spongiosamasse bleibt konstant.

Das Ausmaß des lokalen Knochenabbaus entspricht also der jeweiligen Abnahme der Beanspruchung. Es ist unabhängig von der vorhandenen Knochenmasse (NEWTON-JOHN und MORGAN, 1970; MORGAN und NEWTON-JOHN, 1969; MEUNIER et al., 1973).

Bei der hier angewandten Methodik kann die Knochenbildung und Knochenresorption nicht direkt beurteilt werden. Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse scheint jedoch der Schluß gerechtfertigt, daß der altersbedingte Knochenabbau auf einem Nachlassen der Osteoblastenaktivität (SCHENK et al., 1969; SCHENK und MERZ, 1969; MERZ und SCHENK, 1970b; DELLING, 1973 und 1974; TANAKA, 1976, JESSERER, 1975 und 1978), bedingt durch die Abnahme des adäquaten - mechanischen - Reizes (MERZ und SCHENK, 1970b), und nicht auf einer gesteigerten Resorption (JOWSEY, 1974 und 1977a) beruht. Der Osteoblast jedenfalls ist - erkennbar am Mechanismus der kompensatorischen Hypertrophie oder an seiner Fähigkeit, die Frakturheilung zu fördern - bis ins höchste Alter durch entsprechende Belastung und Entlastung in seiner Funktion lenkbar (UEHLINGER und PULS, 1967).

Hier kann die "Prophylaxe gegen den Altersknochen" einsetzen. Durch Gymnastik und Muskeltraining muß der Abnahme der Beanspruchung des Skelets entgegengewirkt werden (SCHLEGEL, 1978). Dies muß geschehen bevor es zu einem Verlust von Knochenstrukturen gekommen ist, da einmal verlorener Knochen nicht mehr ersetzt wird (UEHLINGER, 1973).

Die Grenzen einer solchen Prophylaxe sind offensichtlich: einerseits führt übertriebene sportliche Betäti-

gung zu einem vorzeitigen Verschleiß der Gelenke (LUSCHNITZ und RIEDERBERGER, 1971), andererseits kommt es im Alter zu einer Abnahme der Elastizität von Bändern und Gelenkkapseln mit entsprechenden Bewegungseinschränkungen und zu einem Absinken der körperlichen Leistungsfähigkeit.

Der Verlust von einer gewissen Knochenmenge muß somit als physiologische Alterserscheinung gewertet werden. Überschreitet der Knochenabbau - bedingt durch mangelndes Training oder eine Osteoblasteninsuffizienz - ein bestimmtes Maß, wird aus der physiologischen Altersatrophie des Knochens die pathologische senile Osteoporose.

Alter (Jahre)	Geschlecht		Σ
	männlich	weiblich	
≤ 29	5	3	8
30 - 39	7	5	12
40 - 49	16	7	23
50 - 59	12	11	23
60 - 69	16	19	35
≥ 70	15	14	29
Σ	71	59	130

Tabelle 1: Alters- und Geschlechtsverteilung
der 130 Verstorbenen

Alter (Jahre)	Fall- zahl (n)	Volumetrische Dichte (V_v) %			Oberflächendichte (S_v) mm ² /cm ³			Spez. Oberfläche (S/V) mm ² /mm ³		
		$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
<u>1 - KALOTTE</u>										
29	8	64.7	3.2	5	3630	108	3	5.75	0.43	7
30 - 39	12	60.6	5.9	10	3174	164	5	5.98	0.69	12
40 - 49	22	66.4	3.0	5	3537.	141	4	5.71	0.43	8
50 - 59	23	63.2	4.0	6	3207	116	4	5.79	0.53	9
60 - 69	34	68.5	2.2	3	3424	98	3	5.29	0.30	6
70	29	63.9	2.9	5	3617	123	3	6.06	0.38	6
<u>2 - FEMURKOPF</u>										
29	8	32.6	3.3	10	3040	132	4	9.90	0.87	9
30 - 39	12	32.9	1.4	4	2981	78	3	9.18	0.36	4
40 - 49	23	31.1	1.2	4	2888	55	2	9.40	0.21	2
50 - 59	23	31.1	1.2	4	2790	51	2	9.18	0.29	3
60 - 69	35	28.4	0.6	2	2664	42	2	9.51	0.20	2
70	29	26.0	0.6	2	2618	33	1	10.17	0.20	2
<u>3 - PECKENKAMM</u>										
29	7	30.4	3.1	10	3184	186	6	10.97	0.82	8
30 - 39	12	32.3	2.1	7	3200	133	4	10.13	0.40	4
40 - 49	23	30.5	1.7	6	3053	91	3	10.45	0.41	4
50 - 59	23	27.1	1.6	6	2747	101	4	10.65	0.43	4
60 - 69	35	25.7	1.1	4	2726	69	3	11.03	0.34	3
70	28	21.9	1.4	6	2381	118	5	11.32	0.41	4

Tabelle 2: (Fortsetzung S. 48 und 49)

Mittelwerte ($\bar{x}$), Standardabweichungen der Mittelwerte (s) und Variationskoeffizienten (V) der volumetrischen Dichte, Oberflächendichte und spezifischen Oberfläche der untersuchten Knochen in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl (n)	Volumetrische Dichte (V_v) %			Oberflächendichte (S_v) mm^2/cm^3			Spez. Oberfläche (S/V) mm^2/mm^3		
		$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
4 - FEMURHALS										
29	8	27.8	1.8	7	2703	107	4	9.98	0.64	6
30 - 39	12	25.5	1.2	5	2468	98	4	9.76	0.27	3
40 - 49	23	22.0	1.0	5	2214	67	3	10.22	0.23	2
50 - 59	23	20.2	0.9	5	2076	68	3	10.48	0.34	3
60 - 69	35	20.0	0.8	4	2014	51	3	10.32	0.26	3
70	29	17.0	0.7	4	1814	45	3	10.99	0.31	3
5 - CALCANEUS										
29	8	26.6	1.5	6	2904	138	5	11.00	0.47	4
30 - 39	12	23.9	1.0	4	2621	112	4	11.00	0.33	3
40 - 49	22	24.1	1.1	5	2501	74	3	10.59	0.23	2
50 - 59	23	22.6	1.0	4	2478	89	4	11.15	0.30	3
60 - 69	35	21.5	0.7	3	2306	69	3	10.87	0.24	2
70	29	21.9	0.8	4	2455	67	3	11.41	0.30	3
6 - FEMUR DIST.										
29	5	24.0	1.7	7	2869	111	4	12.15	0.80	7
30 - 39	7	23.4	1.0	4	2695	87	3	11.60	0.39	3
40 - 49	7	19.1	1.2	6	2356	176	8	12.34	0.47	4
50 - 59	14	19.2	1.3	7	2309	125	5	12.19	0.24	2
60 - 69	5	21.5	1.4	7	2508	74	3	11.86	0.84	7
70	17	17.7	0.9	5	2250	66	3	13.00	0.45	4

Tab. 2: (Fortsetzung)

Alter (Jahre)	Fall- zahl (n)	Volumetrische Dichte (V_v) %			Oberflächendichte (S_v) mm^2/cm^3			Spez. Oberfläche (S/V) mm^2/mm^3		
		$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
<u>7 - LWK III</u>										
29	8	23.1	1.6	7	2740	101	4	12.09	0.54	4
30 - 39	11	22.6	1.4	6	2537	130	5	11.34	0.30	3
40 - 49	25	21.0	1.0	5	2445	73	3	11.90	0.31	3
50 - 59	23	18.1	1.0	6	2139	72	3	12.14	0.35	3
60 - 69	35	17.8	0.9	5	2004	65	3	11.69	0.29	2
70	29	14.5	0.9	6	1729	73	4	12.45	0.39	3
<u>8 - LWK V</u>										
29	8	22.9	1.0	4	2706	46	2	11.97	0.50	4
30 - 39	12	23.4	1.3	6	2586	110	4	11.16	0.27	2
40 - 49	23	21.6	1.1	5	2460	66	3	11.75	0.37	3
50 - 59	23	19.4	0.7	4	2228	60	3	11.69	0.30	3
60 - 69	35	17.5	0.9	5	2038	67	3	12.18	0.36	3
70	29	15.3	0.7	5	1841	59	3	12.34	0.31	3
<u>9 - STERNUM</u>										
29	8	19.9	3.7	19	2696	296	11	14.49	0.83	6
30 - 39	11	18.6	1.8	10	2367	168	7	13.16	0.56	4
40 - 49	23	20.0	1.9	10	2377	134	6	13.22	0.69	5
50 - 59	23	15.9	1.5	9	2048	109	5	13.72	0.57	4
60 - 69	35	16.7	0.9	5	2063	83	4	12.80	0.33	3
70	29	11.8	0.9	8	1638	86	5	14.80	0.50	3

Tab. 2: (Fortsetzung)

	V_V - Alter		S_V - Alter		S/V - Alter	
	<50 Jahre	≥ 50 Jahre	<50 Jahre	≥ 50 Jahre	<50 Jahre	≥ 50 Jahre
1 - Kalotte	0.02	- 0.08	0.03	0.11	0.01	0.16
2 - Femurkopf	- 0.12	- 0.46	- 0.45	- 0.27	- 0.09	0.37
3 - Beckenkamm	0.02	- 0.29	- 0.40	- 0.32	- 0.18	0.09
4 - Femurhals	- 0.48	- 0.34	- 0.56	- 0.39	0.12	0.17
5 - Calcaneus	- 0.16	- 0.10	- 0.29	- 0.05	- 0.14	0.13
6 - Femur dist.	- 0.21	- 0.25	- 0.47	- 0.12	- 0.08	0.35
7 - LWK III	- 0.21	- 0.29	- 0.51	- 0.41	- 0.05	0.07
8 - LWK V	- 0.16	- 0.42	- 0.56	- 0.51	- 0.08	0.17
9 - Sternum	0.03	- 0.35	- 0.38	- 0.41	- 0.16	0.23

Tabelle 3:

Korrelationskoeffizienten zwischen der volumetrischen Dichte (V_V), Oberflächendichte (S_V) sowie spezifischen Oberfläche (S/V) der untersuchten Knochen und dem Alter für die Altersgruppen unter und ab 50 Jahre sowie für beide Gruppen gemeinsam

	$V_v - S_v$			$V_v - S/V$			$S_v - S/V$		
	<50 Jahre	≥50 Jahre	ges.	<50 Jahre	≥50 Jahre	ges.	<50 Jahre	≥50 Jahre	ges.
1 - Kalotte	- 0.56	- 0.60	- 0.59	- 0.96	- 0.95	- 0.95	0.71	0.75	0.74
2 - Femurkopf	0.48	0.42	0.53	- 0.84	- 0.83	- 0.81	0.05	0.12	0.04
3 - Beckenkamm	0.82	0.83	0.85	- 0.87	- 0.80	- 0.80	- 0.50	- 0.38	- 0.43
4 - Femurhals	0.80	0.74	0.81	- 0.63	- 0.77	- 0.71	- 0.06	- 0.18	- 0.21
5 - Calcaneus	0.80	0.77	0.79	- 0.58	- 0.60	- 0.60	0.01	0.03	- 0.01
6 - Femur dist.	0.79	0.82	0.84	- 0.54	- 0.76	- 0.69	0.09	- 0.28	- 0.22
7 - LWK III	0.82	0.87	0.89	- 0.77	- 0.76	- 0.73	- 0.28	- 0.42	- 0.38
8 - LWK V	0.81	0.85	0.87	- 0.78	- 0.79	- 0.76	- 0.29	- 0.42	- 0.41
9 - Sternum	0.86	0.91	0.89	- 0.86	- 0.78	- 0.78	- 0.64	- 0.54	- 0.56

Tabelle 4:

Korrelationskoeffizienten zwischen der volumetrischen Dichte (V_v) und Oberflächendichte (S_v), der volumetrischen Dichte (V_v) und spezifischen Oberfläche (S/V) sowie der Oberflächendichte (S_v) und spezifischen Oberfläche (S/V) der untersuchten Knochen für die Altersgruppen unter und ab 50 Jahre sowie für beide Gruppen gemeinsam

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Kalot-	Femur-	Becken-	Femur-	Cal-	Femur	LWK	LWK V
	te	kopf	kamm	hals	canus	dist.	III	
2 - Femurkopf	0.12							
3 - Beckenkamm	0.21	0.39						
4 - Femurhals	0.17	0.56	0.54					
5 - Calcaneus	0.14	0.42	0.49	0.45				
6 - Femur dist.	0.15	0.55	0.28	0.57	0.56			
7 - LWK III	0.14	0.40	0.57	0.57	0.44	0.38		
8 - LWK V	0.18	0.41	0.48	0.50	0.30	0.38	0.62	
9 - Sternum	0.27	0.33	0.50	0.40	0.34	0.51	0.60	0.60

Tabelle 5a:

Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der volumetrischen Dichte der untersuchten Knochen

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Kalot- te	Femur- kopf	Becken- kamm	Femur- hals	Cal- caneus	Femur dist.	LWK III	LWK V
2 - Femurkopf	0.00							
3 - Beckenkamm	- 0.18	0.46						
4 - Femurhals	- 0.10	0.74	0.60					
5 - Calcaneus	- 0.01	0.52	0.54	0.47				
6 - Femur dist.	- 0.18	0.66	0.44	0.67	0.64			
7 - LWK III	- 0.06	0.52	0.66	0.69	0.38	0.31		
8 - LWK V	- 0.02	0.48	0.57	0.60	0.30	0.31	0.81	
9 - Sternum	- 0.20	0.38	0.66	0.56	0.36	0.41	0.68	0.67

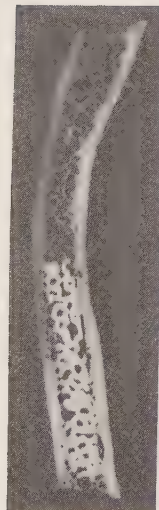
Tabelle 5b:

Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der Oberflächendichte der untersuchten Knochen

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Kalot- te	Femur- kopf	Becken- kamm	Femur- hals	Cal- caneus	Femur dist.	LWK III	LWK V
2 - Femurkopf	0.19							
3 - Beckenkamm	0.20	0.37						
4 - Femurhals	0.15	0.56	0.41					
5 - Calcaneus	0.27	0.47	0.42	0.44				
6 - Femur dist.	0.25	0.54	0.08	0.35	0.48			
7 - LWK III	0.28	0.44	0.55	0.32	0.45	0.22		
8 - LWK V	0.17	0.38	0.45	0.32	0.38	0.27	0.52	
9 - Sternum	0.34	0.35	0.42	0.34	0.39	0.48	0.49	0.49

Tabelle 5c:

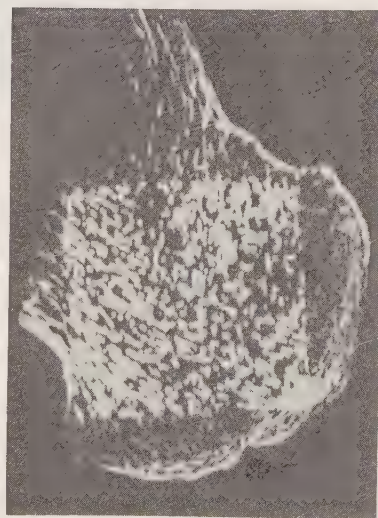
Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der spezifischen Oberfläche der untersuchten Knochen



a



b



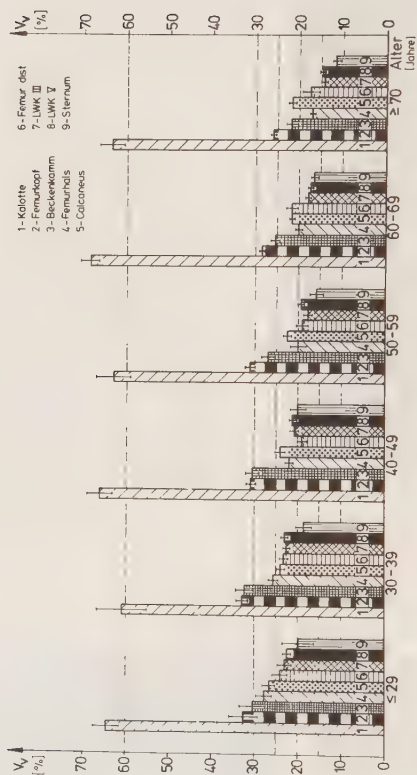
c



d

Abb. 1a - d:

Monitorbilder des Leitz-Textur-Analyse-Systems der markierten Spongiosa von Iliote (a), Beckenkamm (b) und Calcaneus (c) mit eingezeichneten Rechteckmaske sowie Femurkopf (d) mit eingezeichneten Kreismaske (Abb. Maßstab ca. 1 : 1.5 - 2.5)



• • • • •
 Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der volumetrischen Dichte (V_v) der Spongiosa untersuchten Knochen in Abhängigkeit vom Lebensalter

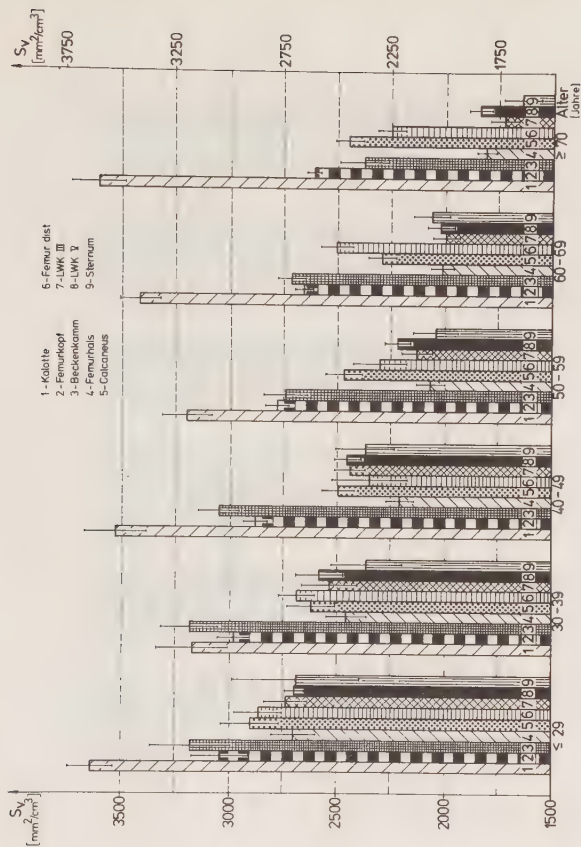
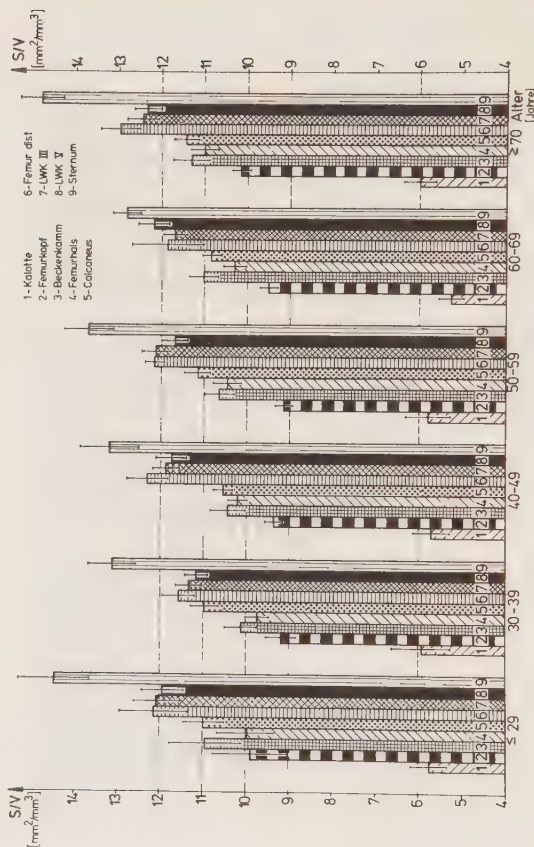


Abb. 2b:
Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Oberflächendichte (S_v) der Spongiosa der untersuchten Knochen in Abhängigkeit vom Lebensalter



U. 20:

tielwerte und Standardabweichun-
 gung der Mittelwerte der spezifi-
 schen Oberfläche (S/V) der Spon-
 giosa der untersuchten Knochen
 Abhängigkeit vom Lebensalter

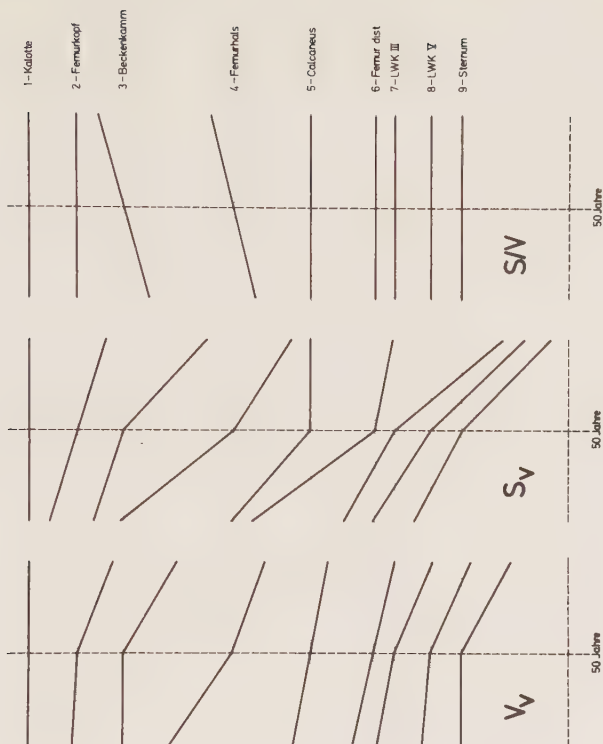
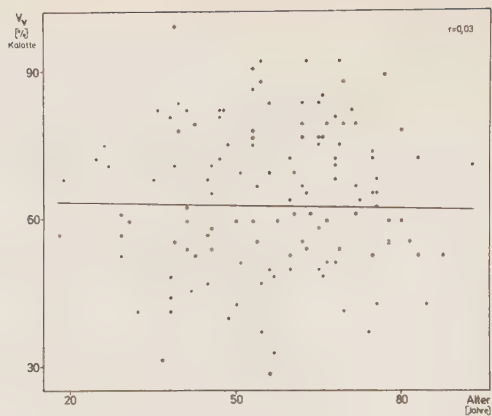
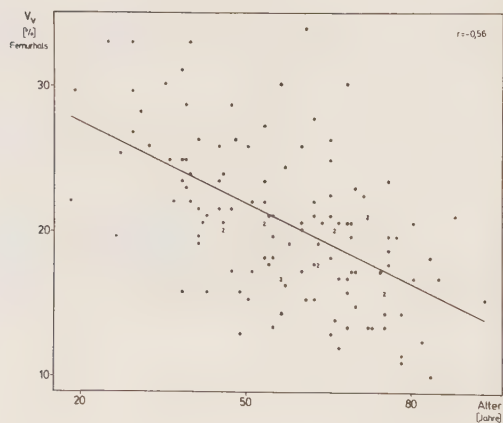


Abb. 3:
Vergleich des Altersverhaltens
der volumetrischen Dichte (V_v),
der oberflächendichte (S_v) und
der spezifischen Oberfläche (S_v/V)
(Stark vereinfachte, unmaßstäb-
liche Darstellung)



a



b

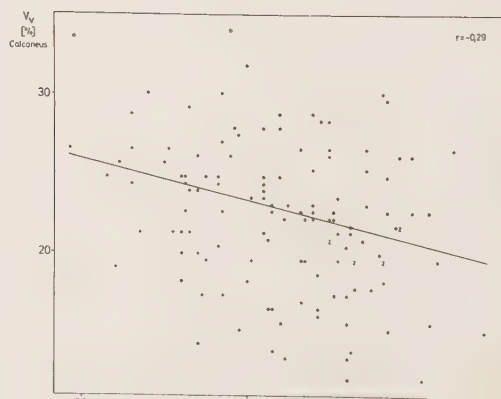


Abb. 4a - c:

Korrelationsdiagramme der volumetrischen Dichte (V_v) von Kalotte (a), Femurhals (b) sowie Calcaneus (c) und des Alters

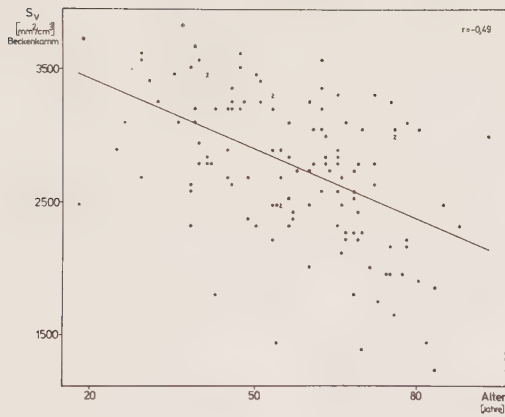


Abb. 5:

Korrelationsdiagramm der Oberflächendichte (S_v)
des Beckenkammes und des Alters

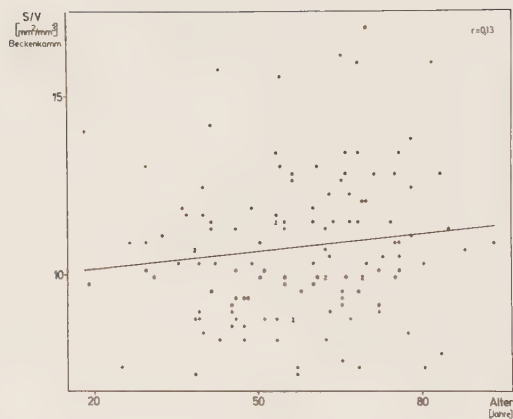
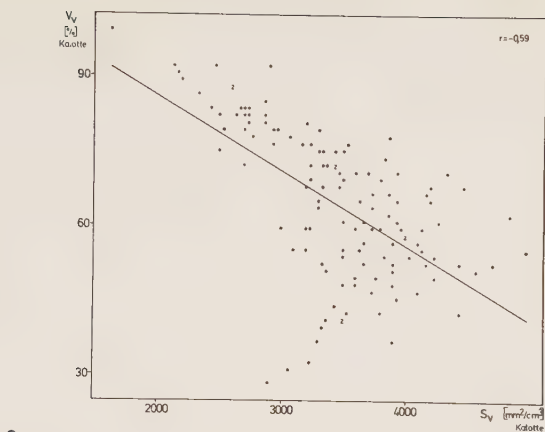
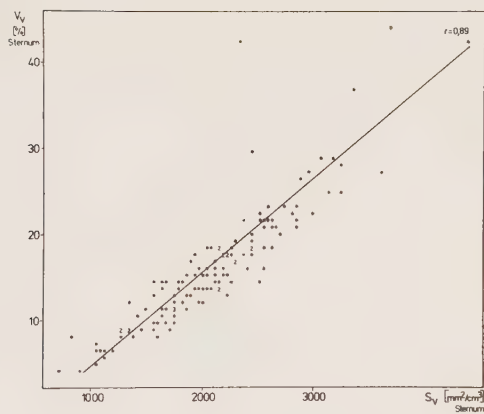


Abb. 6:

Korrelationsdiagramm der spezifischen Oberfläche (S/V)
des Beckenkammes und des Alters



a



b

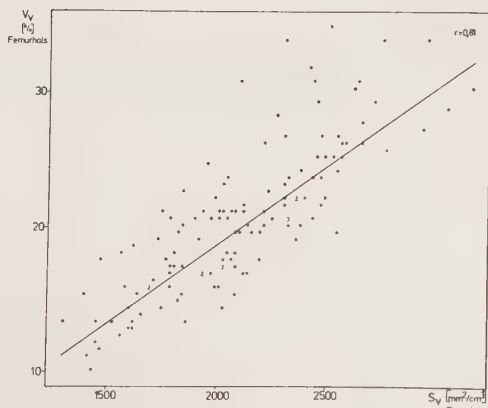


Abb. 7a - c:

Korrelationsdiagramme der volumetrischen Dichte (V_v) und der Oberflächendichte (S_v) von Kalotte (a), Sternum (b) und Femurhals (c)

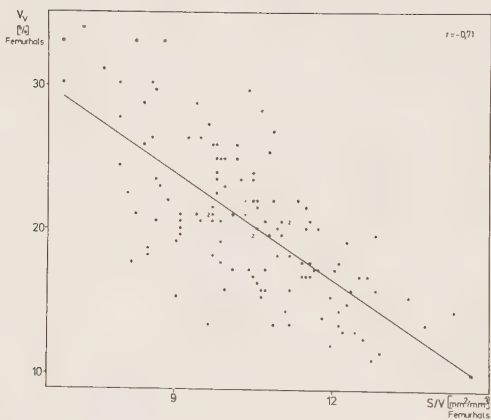


Abb. 8:

Korrelationsdiagramm der volumetrischen Dichte (V_v)
und spezifischen Oberfläche (S/V) des Femurhalses

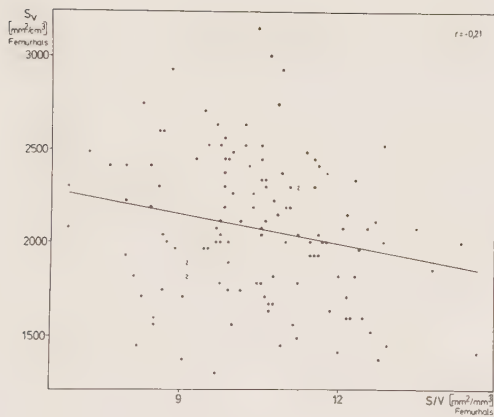
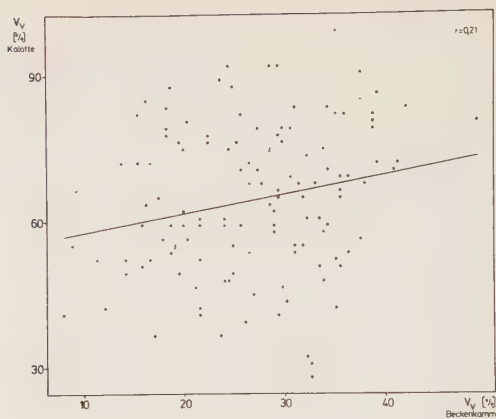
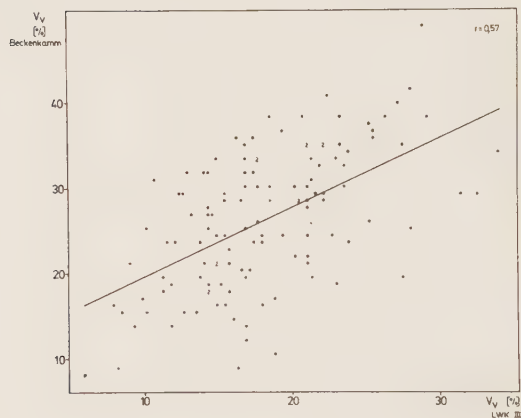


Abb. 9:

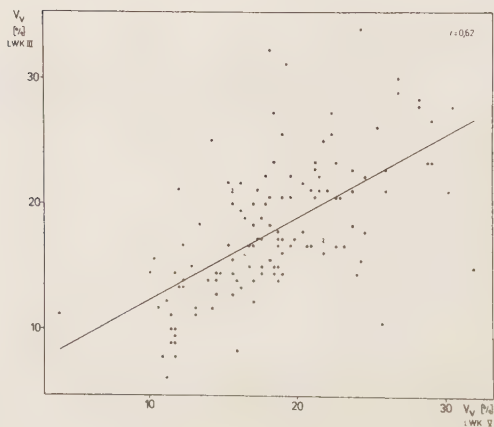
Korrelationsdiagramm der Oberflächendichte (S_v)
und spezifischen Oberfläche (S/V) des Femurhalses



a



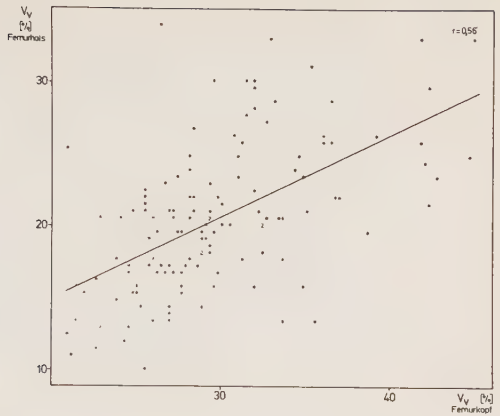
b



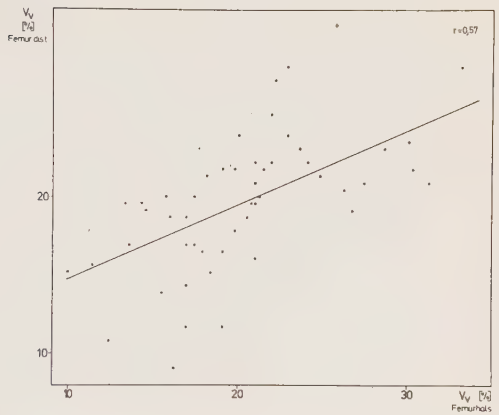
c

Abb. 10a - c:

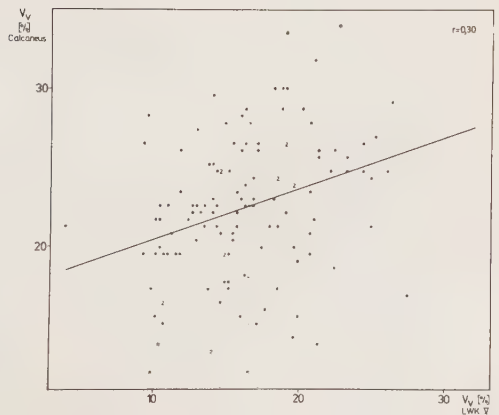
Korrelationsdiagramme der volumetrischen Dichte (V_v) von Kalotte und Beckenkamm (a), Beckenkamm und 3. LWK (b) sowie 3. und 5. LWK (c)



d



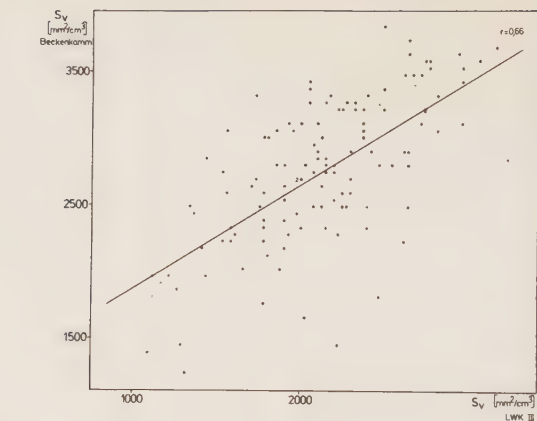
e



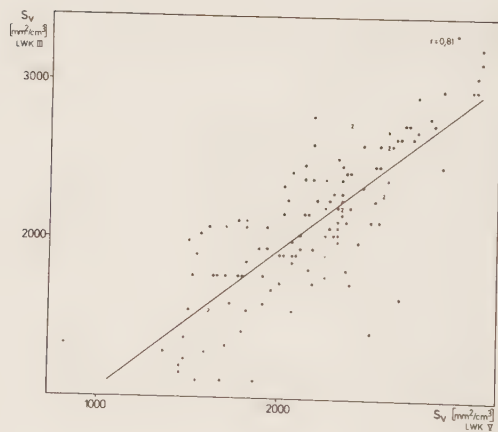
f

Abb. 10d - f:

Korrelationsdiagramme der volumetrischen Dichte (V_v) von Femurhals und Femurkopf (d), distalem Femurende und Femurhals (e) sowie Calcaneus und 3. LWK (f)



a



b

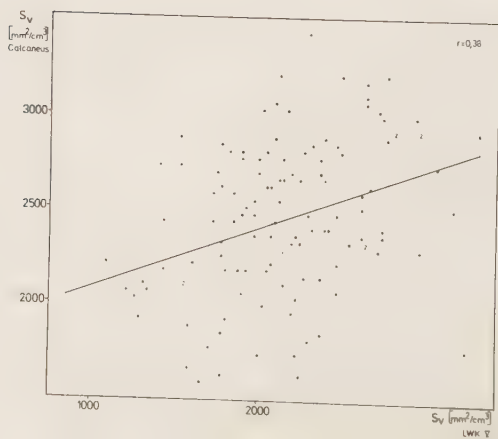
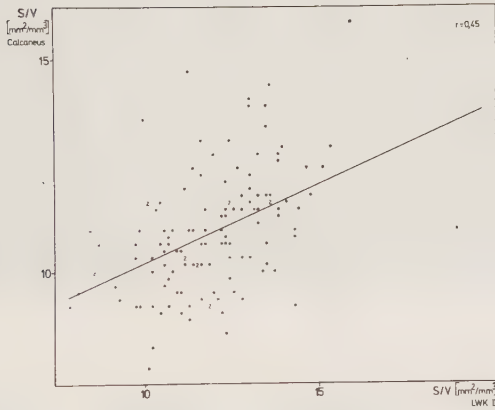
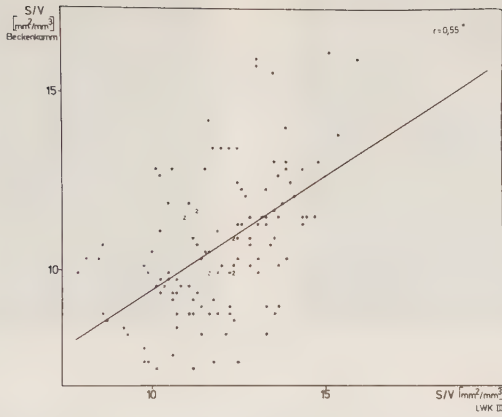


Abb. 11a - c:

Korrelationsdiagramme der Oberflächendichte (S_v) von Beckenkamm und 3. LWK (a), 3. und 5. LWK (b) sowie Calcaneus und 5. LWK (c)



b

Abb. 12a und b:

Korrelationsdiagramme der spezifischen Oberfläche (S/V) von Beckenkamm und 3. LWK (a) sowie Calcaneus und 3. LWK (b)

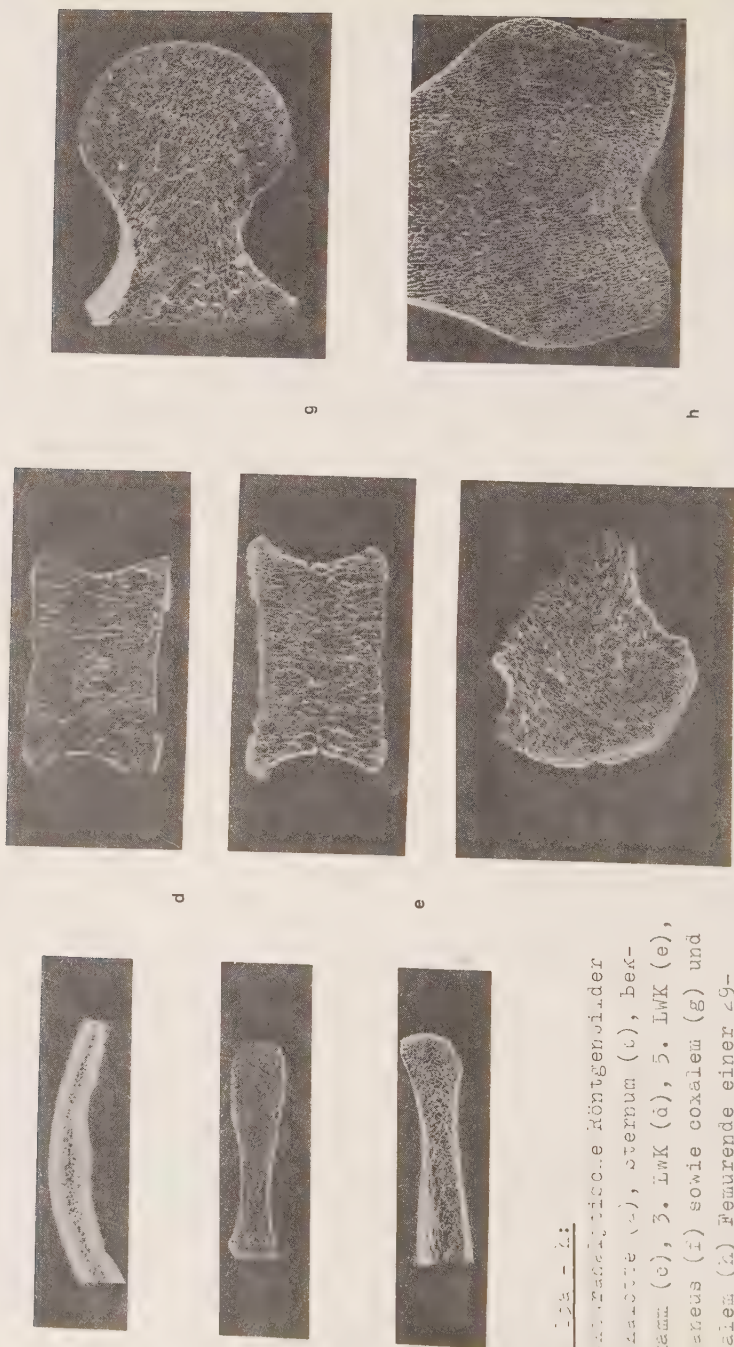


Abb. 123 - 2:
 Röntgenbilder
 des Humerus (a), Sternum (c), Becken-
 gelenk (e), 3. LWK (d), 5. LWK (e),
 Lendenwirbel (f) sowie coxalem (g) und
 istalem (h) Femurende einer 29-
 jährigen Frau
 ... Maßstab 1:1

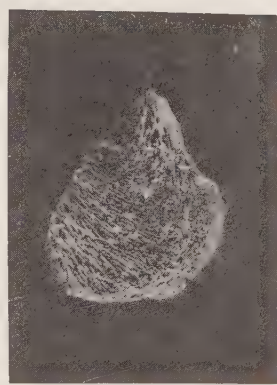
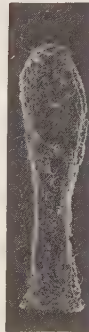


Abb. 14a - h:
 Strukturanalytische Röntgenbilder
 von Kalotte (a), Sternum (b), Beck-
 enkamm (c), 3. LWK (d), 5. LWK (e),
 Calcaneus (f) sowie coxalem (g) und
 distalem (h) Femurende einer 80-
 jährigen Frau
 Abb. Maßstab 1:1

Z u s a m m e n f a s s u n g

Bei 130 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 18 - 93 Jahren wurde nach Ausschluß von klinisch manifesten Knochenerkrankungen die S p o n g i o s a von der Hinterhauptsschuppe der Schädelkalotte, Manubrium sterni, 3. und 5. Lendenwirbelkörper (LWK), Beckenkamm, Femurkopf, Femurhals, distalem Femurende und Calcaneus in Abhängigkeit von Geschlecht, Lebensalter und Mechanik untersucht. Die Messungen erfolgten an Röntgenbildern von 100 μ dicken Knochengroßflächenschliffen mit Hilfe des Leitz-Textur-Analyse-Systems.

G e s c h l e c h t s s p e z i f i s c h e Unterschiede der Spongiosastruktur konnten bei keinem Knochen festgestellt werden.

Die v o l u m e t r i s c h e D i c h t e (Vv) der untersuchten neun Skeletabschnitte ist verschieden: die Kalotte hat mit 65 % ungefähr die doppelte Spongiosamasse des Femurkopfes; es folgen Beckenkamm, Femurhals, Calcaneus, distales Femurende, 3. und 5. Lendenwirbelkörper (LWK) und schließlich das Sternum, das mit 20 % weniger als ein Drittel der Spongiosamasse der Kalotte aufweist.

Die volumetrische Dichte der Kalotte verändert sich während des Lebens nicht.

In den anderen Skeletabschnitten vollzieht sich ein unterschiedlicher Altersabbau: im distalen Femurende und Calcaneus nimmt die Spongiosa von der 2. Lebensdekade an gleichmäßig um etwa ein Viertel bzw. ein Sechstel ab. Im Sternum, Beckenkamm sowie 3. und 5. LWK setzt der Spongiosaabbau erst nach dem 50. Lebensjahr, im Femurkopf nach dem 60. Lebensjahr ein. Der Femurkopf verliert dann ungefähr ein Fünftel, der Beckenkamm ein Viertel, die Wirbelkörper ein Drittel und das Sternum fast 40 % der ursprünglichen Spongiosamasse. Im Femurhals wird die Spongiosa bereits vor dem 50. Lebensjahr um ein Fünftel reduziert, in den folgenden Jahren nimmt die verbleibende Spongiosamasse um ein weiteres Fünftel ab, sie unterliegt damit dem stärksten Abbau der 9 Knochen. Sternum, Beckenkamm und 3. und 5. LWK verlieren trotz unterschiedlicher Anfangswerte die gleiche Spongiosamasse.

Die Werte der O b e r f l ä c h e n d i c h t e (Sv) der neun Skeletabschnitte stehen in einem ähnlichen Verhältnis zueinander wie die Vv-Werte, lediglich die Oberflächendichte des Beckenkammes sinkt erst nach dem 50. Lebensjahr unter die des Femurkopfes, und die Oberfläche des Femurhalses weist die gleiche Größenordnung auf wie die der Wirbelkörper oder des Sternum.

Auch die Oberflächendichte der Kalotte bleibt während des Lebens unverändert.

Beim Beckenkamm und Femurhals ist die Abnahme der Oberflächendichte etwas geringer als die der volumetrischen Dichte, bei den anderen Knochen ist sie ungefähr gleich.

Der Vergleich der s p e z i f i s c h e n O b e r -
f l ä c h e n (S/V) - als reziprokes Maß des mitt-
leren Bälkchendurchmessers - zeigt, daß die Bälkchen
einiger Knochen trotz unterschiedlicher Vv- oder Sv-
Werte gleich dick sind: die Kalotte hat die niedrigste
spezifische Oberfläche, der S/V -Wert des Sternum be-
trägt ungefähr das 2.5fache davon. Dazwischen bilden
Femurkopf und Femurhals, Beckenkamm und Calcaneus,
sowie 3. und 5. LWK und distales Femurende drei Grup-
pen gleicher Bälkchenstärke, wobei die erste Gruppe
die dicksten, die letzte die dünnsten Bälkchen hat.

Auf Grund der Konstanz von Vv und Sv bleibt auch
die spezifische Oberfläche der Kalotte unverändert.

Bei den anderen Knochen ist nur beim Beckenkamm und
Femurhals die Abnahme der volumetrischen Dichte grös-
ser als die Abnahme der Oberflächendichte, entspre-
chend nimmt hier der mittlere Bälkchendurchmesser
ab, während er sonst konstant bleibt.

Die individuelle Spongiosastruktur der einzelnen
Skeletabschnitte entspricht der unterschiedlichen
G r ö ß e u n d A r t d e r B e a n s p r u c h u n g :
3. und 5. LWK, Femurkopf und distales Femurende wer-
den vornehmlich auf D r u c k , die Kalotte auf
D r u c k oder Z u g und Beckenkamm, Femurhals
und Calcaneus auf B i e g u n g beansprucht.

Der Altersabbau resultiert aus der allgemeinen Bean-
spruchungsminderung des Skelets. Im Femurkopf, dista-
lem Femurende, Calcaneus sowie 3. und 5. LWK kommt
es unter einem Verlust an Sicherungsstrukturen zu
einer allgemeinen Verdünnung der Trabekel, der
durch die Verstärkung der funktionell notwendigen

k o m p e n s a t o r i s c h entgegengewirkt wird, so daß der mittlere Bälkchendurchmesser gleich bleibt. Im Beckenkamm und Femurnals bleibt wegen des Fehlens ausgesprochener Sicherungsstrukturen die kompensatorische Verstärkung von Bälkchen hinter der Verdünnung zurück, der mittlere Bälkchendurchmesser nimmt ab. In der Spongiosa der Kalotte findet wegen der gleichbleibenden mechanischen Verhältnisse ein Altersumbau nicht statt.

Die S t ä r k e des Knochenverlustes ist abhängig von der Beanspruchungs ä n d e r u n g , sie ist unabhängig von der v o r h a n d e n e n Knochenmasse.

Wegen der unterschiedlichen Reaktionsweisen der einzelnen Knochen sind Rückschlüsse über die Spongiosam a s s e - nicht über die Spongiosa s t r u k t u r - nur zwischen Knochen vergleichbarer Skeletabschnitte (Stammskelet oder Femurabschnitte) mit Einschränkungen möglich.

Ein früh einsetzendes universelles körperliches T r a i n i n g kann dem Abbau entgegenwirken; die Grenzen eines solchen Trainings liegen im allgemeinen Altern des Menschen.

L i t e r a t u r

- Ackermann, D., W. Catel, P.K. Hörman, H. Kern:
Experimentelle Untersuchungen über das
Konstruktionsprinzip des menschlichen
Femur.
Z. f. Zellf. 124, 12-38 (1972)
- Arnold, J.S., M.H. Bartely, S.A. Tont, D.P. Jenkins:
Skeletal changes in aging and disease.
Clin. Orthop. 49, 17-38 (1966)
- Atkinson, P.J.:
Variation in trabecular structure of
vertebrae with age.
Calc. Tiss. Res. 1, 24-32 (1967)
- Beneke, G.: Pathologie der wichtigsten Wirbelsäulen-
erkrankungen.
Therapiewoche 29, 3903-3922 (1975)
- Benninghoff-Goerttler:
Lehrbuch der Anatomie des Menschen. Bd. I
Hrsg. J. Staubesand
München-Berlin-Wien: Urban & Schwarzenberg
1975
- Beutel, P., H. Küffner, E. Röck, W. Schubö:
Statistical package for the social sciences.
Stuttgart-New York: Fischer 1978
- Blaschke, R.: Indirekte Volumen- Oberflächen-, Größen-
und Formfaktorbestimmungen mittels Zähl-
figuren in Schnittebenen mit dem Leitz-
Zählokular.
Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. IV, 44-49 (1967)
- Borcke, E., F. Heuck:
Das "quantitative Röntgenbild" des Knochens.
Röntgen 22, 3-9 (1975)

- Börner, W., S. Grehn, E. Moll, E. Rauh:
Messung der Absorption des Fingerknochens
mit einem ^{125}J -Profilscanner.
Quantitative Methode zur Erkennung der
Osteoporose.
Fortschr. Röntgenstr. 110, 378-387 (1969)
- Braune, W., O. Fischer:
Der Gang des Menschen. I. Teil.
Versuche am unbelasteten und belasteten
Menschen.
Abhandl. d. Math.-Phys. Cl. d. k. Sächs.
Gesellsch. Wissensch. 21, 153-322 (1895)
(zit. nach MAQUET, 1976)
- Caldwell, R.A., D.H. Collins:
Assessment of vertebral osteoporosis by
radiographic and chemical methods post-
mortem.
J. Bone Joint Surg. 43-B, 346-361 (1961)
- Catel, W.: Gefügekundliche Untersuchungen über Struk-
tur und Funktion des coxalen Femurendes
des Menschen.
Erg. Anat. 43: Heft 3
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1970
- Chalmers, J., J.K. Weaver:
Cancellous bone: Its strength and changes
with aging and an evaluation of some methods
for measuring its mineral content.
Part II: An evaluation of some methods for
measuring osteoporosis.
J. Bone Joint Surg. 48-A, 299-308 (1966)
- Chalmers, J.: Distribution of osteoporotic changes
in the aging skeleton.
Clin. Endocrinol. Metab. 2, 203-220 (1973)
- Dambacher, M.A., U. Steiger, H.G. Haas:
Osteoporose. Neue Aspekte der Pathophysi-
ologie und der Therapie.
Med. Klin. 66, 33-39 (1971)
- Delesse, M.A.: Procédé mécanique pour déterminer la
composition des roches.
3e éd. Paris: F. Saty 1866

- Delling, G.: Age-related bone changes. Histomorphometric investigation of the structure of human cancellous bone.
Curr. Top. Path. 58, 117-147 (1973)
- Delling, G.: Altersabhängige Skeletveränderungen. Histomorphometrische Untersuchungen an der menschlichen Beckenkammspongiosa.
Klin. Wschr. 52, 318-325 (1974)
- Dequeker, J., J. Remans, R. Franssen, J. Wass: Ageing patterns of trabecular and cortical bone and their relationship.
Calc. Tiss. Res. 7, 23-30 (1971)
- Dietrich, J.: Zur Spongiosastruktur menschlicher Wirbelkörper.
Inaug. Diss., Würzburg 1956
- Dominok, G.W.: Zur Alters- und Geschlechtsbestimmung aus der Morphologie der menschlichen Schädelskalotte.
Zbl. allg. Path. path. Anat. 100, 54-64 (1959/1960)
- Dunnill, M.S., J.A. Anderson, R. Whitehead: Quantitative histological studies on age changes in bone.
J. Path. Bact. 94, 275-291 (1967)
- Eger, W., H.J. Gerner, H. Kämmerer: Bau und Dichte der menschlichen Spongiosa in Rippe, Wirbel und Becken als Ausdruck der statischen Funktion.
Arch. orthop. Unfall-Chir. 62, 97-112 (1967)
- Ehler, E., H. Pfau, G.-H. Schumacher: Der menschliche Schädel als Membranschale.
in: Schumacher, G.-H., W. Stach: Adaptation des Skeletsystems.
Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, 154-159 (1971)
- Elias, H.: Stereology.
Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1967

Ellis, H.A., K.M. Peart:

Quantitative observations on mineralized
and nonmineralized bone in the iliac crest.
J. clin. Path. 25, 277-286 (1972)

Fischer, O.: Der Gang des Menschen, II. Teil: die Be-
wegungen des Gesamtschwerpunktes und die
äußeren Kräfte.

Abh. Kgl. sächs. Ges. Wiss. math.-phys. Kl.
Bd. 25, 1-163 (1899)

(zit. nach PAUWELS, 1973)

Frost, H.M.: Presence of microscopic cracks in vivo
in bone.

Med. Bull. 8, 25-35 (1960)

Gebhardt, M., H. Zwicker:

Zur röntgenologischen Mineraläquivalent-
bestimmung des Knochens. 1. Mitteilung:
Die korrekte Anwendung der "röntgenologi-
schen Substanzanalyse mittels differenter
Strahlenqualität".

Fortschr. Röntgenstr. 112, 798-805 (1970)

Hennig, A.: Bestimmung der Oberfläche beliebig gefor-
mter Körper.

Mikrosk. 11, 1-20 (1956)

Hennig, A.: Kritische Betrachtungen zur Volumen- und
Oberflächenmessung in der Mikroskopie.

Zeiss. Werkz. 30, 78-86 (1958)

Heuck, F.: Allgemeine Morphologie und Biodynamik
des Knochens im Röntgenbild.

Fortschr. Röntgenstr. 112, 354-365 (1970)

Heuck, F., E. Schmidt:

Die quantitative Bestimmung des Mineral-
gehaltes der Knochen aus dem Röntgenbild.

Fortschr. Röntgenstr. 93, 523-554 (1960)

Jesserer, H.: Osteoporose: Pathologie, Klinik und
Therapie.

Therapiewoche 29, 3970-3978 (1975)

- Jesserer, H.: Osteoporose.
Rheinisches Ärzteblatt, Heft 16a, 619-627
(1978)
- Jowsey, J.: Die mikroradiographische Beurteilung der
Knochenstruktur.
Triangel 12, 93-102 (1974)
- Jowsey, J.: Osteoporosis: Dealing with a crippling
bone disease of the elderly.
Geriatrics 32, 41-50 (1977a)
- Jowsey, J.: The bone biopsy.
Topics in bone and mineral disorders.
New-York, London: Plenum Medical Book
Company 1977b
- Junghanns, H.: Die Pathologie der Wirbelsäule.
in: Lubarsch, O., F. Henke:
Handbuch der speziellen pathologischen
Anatomie und Histologie 9/4. Teil: 218-242
Berlin: Springer 1939
- Knese, K.-H.: Knochenstruktur als Verbundbau.
Stuttgart: Thieme 1958
- Knief, J.-J.: Materialverteilung und Beanspruchungs-
verteilung im coxalen Femurende. Densito-
metrische und spannungsoptische Unter-
suchungen.
Z. Anat. Entwickl. Gesch. 126, 81-116 (1966)
- Kriester, A.: Möglichkeiten und Grenzen objektiver
radiologischer Verfahren zur Bestimmung
des Knochenmineralgehaltes durch verglei-
chende Absorptionsmessung.
Fortschr. Röntgenstr. 109, 174-184 (1968)
- Krokowski, E.: Die Absorption von Röntgenstrahlen im
Knochen.
Fortschr. Röntgenstr. 91, 76-84 (1959)

- Krokowski, E.: Die röntgenologische Substanzanalyse des Knochens. Prinzip und praktische Durchführung.
Fortschr. Röntgenstr. 108, 394-400 (1968)
- Krokowski, E.: Osteoporose - kein Calciummangelsyndrom.
Med. Klin. 66, 1770-1776 (1971a)
- Krokowski, E.: Radiologische Feststellung der Frakturschwelle.
Verh. Dtsch. Ges. Orthop. u. Traumat. 57,
255-259
Stuttgart: Enke 1971b
- Krokowski, E.: Radiologische Möglichkeiten zur individuellen Diagnostik und pathogenetischen Deutung der Osteoporose.
Röntgenpraxis 28, 82 (1975)
- Krokowski, E., M. Fricke:
Osteoporose - mehr als eine Knochenkrankheit.
Med. Klin. 70, 822-829 (1975)
- Aruse, H.-P.: Histologie der Osteoporose.
Verh. Dtsch. Ges. f. Orthop. u. Traumat. 57,
226-230
Stuttgart: Enke 1971
- Kummer, B.: Bauprinzipien des Säugetierskeletes.
Stuttgart: Thieme 1959
- Kummer, B.: Funktioneller Bau und funktionelle Anpassung des Knochens.
Anat. Anz. 110, 261-293 (1962)
- v. Lanz, T., W. Wachsmuth:
Praktische Anatomie des Menschen I/e,
Bein und Statik.
(Hrsg. J. Lang, W. Wachsmuth)
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1972

- Luschnitz, E., J. Riedeberger:
Skeletveränderungen bei Hochleistungs-
sportlern.
in: Schumacher, G.-H., W. Stach:
Adaptation des Skeletsystems.
Wissenschaftliche Zeitschrift der Uni-
versität Rostock, 66 und 67 (1971)
- Maquet, P.G.J.: Biomechanics of the knee.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1976
- Merz, W.A.: Die Streckenmessung an gerichteten Struk-
turen im Mikroskop und ihre Anwendung zur
Bestimmung von Oberflächen-Volumen-Rela-
tionen im Knochengewebe.
Mikroskopie 22, 132-142 (1967)
- Merz, W.A., R.K. Schenk:
Quantitative structural analysis of human
cancellous bone.
Acta anat. 75, 54-66 (1970a)
- Merz, W.A., R.K. Schenk:
A quantitative histological studie on bone
formation in human cancellous bone.
Acta anat. 76, 1-15 (1970b)
- Meunier, P., P. Courpron, C. Edouard, J. Bernard,
J. Bringuier, G. Vignon:
Physiological senile involution and patho-
logical rarefaction of bone. Quantitative
and comparative histological data.
Clin. Endocrinol. Metab. 2, 239-256 (1973)
- Morgan, D.B., H.F. Newton-John:
Bone loss and senescence.
Gerontologie 15, 140-154 (1969)
- Müller, K.: Interdisziplinäre Entwicklung eines künst-
lichen Kniegelenks (Kniegelenks-Endoprothese)
in Kunststoff-Metall-Kombinationsbauweise.
Z. f. Werkstofftechnik/J. of Materials
Technology 2, 290-306 (1975)

- Nagel, M., F. Heuck, E. Epple, D. Decker:
Bestimmung des Knochenmineralgehaltes aus
dem Röntgenbild mit Hilfe der digitalen
Datenverarbeitung.
Fortschr. Röntgenstr. 121, 604-612 (1979)
- Newton-John, H.F., D.B. Morgan:
The loss of bone with age, osteoporosis,
and fractures.
Clin. Orthop. 71, 229-252 (1970)
- Nokso-Koivisto, V.-M., E.M. Alhava, H. Olkkonen:
Measurement of cancellous bone strength
correlations with mineral density, ageing
and disease.
Ann. Clin. Res. 8, 399-402 (1976)
- Olah, A.J.: Aussagemöglichkeiten der histologischen
Knochenmorphometrie.
Internist 16, 345-352 (1975)
- Otto, H., U. Zeus, P. Pförtner:
Morphologie und Morphometrie der Alters-
osteoporose am Beckenkamm, Femur und
12. Brustwirbel.
Beitr. path. Anat. 138, 436-449 (1969)
- Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionel-
len Anatomie des Bewegungsapparates.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1965
- Pauwels, F.: Atlas zur Biomechanik der gesunden und
kranken Hüfte. Prinzipien, Technik und
Resultate einer kausalen Therapie.
Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1973
- Pauwels, F.: Über die Bedeutung der Markhöhle für
die mechanische Beanspruchung des Röhren-
knochens.
Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 145, 81-85 (1974)
- Pauwels, F.: Über die gestaltende Wirkung der funk-
tionellen Anpassung des Knochens.
Anat. Anz. 139, 213-220 (1976)

- Pesch, H.-J., F. Henschke, U. Zeus:
Zur Methodik des Knochengroßflächen-
schliffes.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 59, 592 (1975)
- Pesch, H.-J., F. Henschke, H. Seibold:
Einfluß von Mechanik und Alter auf den
Spongiosaumbau in Lendenwirbelkörpern
und im Schenkelhals.
Virch. Arch. A Path. Anat. and Histol. 377,
27-42 (1977)
- Pesch, H.-J., M. Kahle, H. Prestele, B. Schorn,
W. Schuster:
Hydroxylapatitgehalt von Lendenwirbelkör-
pern und Schenkelhals.
Fortschr. Röntgenstr. 130, 491-496 (1979)
- Pesch, H.-J., H.-P. Scharf, G. Lauer, H. Seibold:
Der altersabhängige Verbundbau der Lenden-
wirbelkörper. Eine Struktur- und Form-
analyse.
Virch. Arch. A Path. Anat. and Histol.
(1980, im Druck)
- Rassow, J., H.J. Bachmann, I. Klaskala:
Messung der Knochenmineralkonzentration
("Hydroxylapatit-Volumenwert") und der
Knochendichte mit einer Zweienergie-
Densitometriemethode in vitro und in vivo.
Fortschr. Röntgenstr. 125, 317-324 (1976)
- Scharf, H.-P., H.-J. Pesch, G. Lauer, H. Seibold:
Der funktionsorientierte Struktur- und
Formwandel der Lendenwirbelkörper in
Abhängigkeit vom Lebensalter.
Verh. Dtsch. Ges. Path. (1980, im Druck)
- Schenk, R.K., W.A. Merz, J. Müller:
A quantitative histological study on bone
resorption in human cancellous bone.
Acta anat. 74, 44-55 (1969)

Schenk, R.K., W.A. Merz:

Histologisch-morphometrische Untersuchungen über Altersatrophie und senile Osteoporose in der Spongiosa des Beckenkammes. Dtsch. med. Wschr. 94, 206-208 (1969)

Schlegel, K.F.:

Orthopädische Probleme der Osteoporose. Rheinisches Ärzteblatt 16a, 628-633 (1978)

Schlüter, K.: Form und Struktur des normalen und des pathologisch veränderten Wirbels.

Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis Bd. 30 Stuttgart: Hippokrates 1965

Serra, I.: Theoretische Grundlagen des Leitz-Textur-Analyse-Systems.

Leitz-Mittl Wiss. u. Techn. Suppl. I, Nr. 4, 125-136 (1973)

Seyss, R.: Zu den Grundprinzipien der Verknöcherung des menschlichen Skeletes.

Pädiatrie, 315-331 (1970)

Singh, M., A.R. Nagrath, P.S. Maini:

Changes in trabecular pattern of the upper end of the femur as an index of osteoporosis. J. Bone Joint Surg. 52-A, 457-467 (1970)

Singh, M., B.L. Riggs, J.W. Beabout, J. Jowsey:

Femoral trabecular pattern index for evaluation of spinal osteoporosis. Ann. of Int. Med. 77, 63-67 (1972)

Sissons, H.A., K.J. Holley, J. Heighway:

Normal bone structure in relation to osteomalacia.

in: l'Ostéomalacie, ed. by D.J. Hioco, 19-31 Paris: Masson & Cie 1967

(zit. nach WAKAMATSU und SISSONS, 1969)

- Strüter, H.-D., J. Rassow:
Über ein Verfahren zur quantitativen Bestimmung des Mineralsalzgehaltes der Knochen mit radioaktiven Isotopen. 1. Mitteilung: Einisotopenmethode.
Fortschr. Röntgenstr. 110, 499-506 (1969)
- Tanaka, Y.: A radiographic analysis on human lumbar vertebrae in the aged.
Virch. Arch. path. Anat. and Histol. 371 A, 351-362 (1976)
- Thiemann, K.J.: Methoden zur Diagnostik der Osteoporose aus radiologischer Sicht.
Internist 11, 564-571 (1966)
- Thoma, R.: Untersuchungen über das Schädelwachstum und seine Störungen.
1. Die Spannungen der Schädelwand.
Virch. Arch. Path. Anat. u. Physiol. u. Klin. Med. 206, 201-271 (1911)
- Uehlinger, E.: Allgemeine Pathologie der Osteoporose und ihre reparativen Möglichkeiten.
Therapiewoche 43, 3949-3953 (1973)
- Uehlinger, E.: Pathologische Anatomie und Pathogenese der Osteoporose.
Therapiewoche 34, 3457-3460 (1974)
- Uehlinger, E., P. Puls:
Funktionelle Anpassung des Knochens auf physiologische und unphysiologische Beanspruchung. Die Frakturheilung und Verschraubung in morphologischer Sicht.
Langenbecks Arch. klin. Chir. 319, 362-374 (1967)
- Underwood, E.E.: Quantitative stereology.
Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company 1970

Vittali, H.P.: Knochenerkrankungen. Histologie und
Klinik.
Basel: Sandoz 1970

Wagner, H.: Präsenile Osteoporose.
Stuttgart: Thieme 1965

Wakamatsu, M., H.A. Sissons:
The cancellous bone of the iliac crest.
Calc. Tiss. Res. 4, 147-161 (1969)

Weaver, J.K., J. Chalmers:
Cancellous bone: its strength and changes
with aging and an evaluation of some
methods for measuring its mineral content.
Part I: Age changes in cancellous bone.
J. Bone Joint Surg. 48-A, 289-299 (1966)

Whitehouse, W.J.:
Scanning electron micrographs of cancellous
bone from the human sternum.
J. Path. 116, 215-224 (1975)

Zeus, U., H.-J. Pesch:
Methode zur radiologisch-quantitativen
Morphometrie spongiöser Knochenstrukturen.
Fortschr. Röntgenstr. 121, 613-616 (1974)

Zwicker, H., M. Gebhardt:
Systematische Fehler bei der Bestimmung
des Knochenmineraläquivalents durch Absorp-
tionsmessung monochromatischer Strahlen.
Fortschr. Röntgenstr. 121, 87-89 (1974)

Lebenslauf

Ich wurde am 5. Dezember 1952 als Sohn des Studien-
direktors Hilmar Lauer und seiner Ehefrau Gerda,
geborene Lemser, in Coburg geboren und bin evangelisch.
Ich bin unverheiratet und habe keine Kinder. Meine
Schwester studiert an der Friedrich-Alexander-Univer-
sität in Erlangen Medizin im 2. Semester.

1959 trat ich in die Volksschule in Ebersdorf bei
Coburg ein. 1961 wechselte ich für die 3. und 4. Klasse
an die Pestalozzischule in Coburg über. Von 1963 an
besuchte ich das Gymnasium Casimirianum in Coburg, an
dem ich 1972 mein Abitur im humanistischen Zweig ab-
legte.

Im Wintersemester 1972/73 immatrikulierte ich mich
an der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen
für das Studium der Mathematik und Physik. Im Sommer-
semester 1974 wechselte ich zum Studium der Medizin
an derselben Universität über. Im Sommer 1975 legte
ich die Ärztliche Vorprüfung, im Sommer 1976 den
Ersten, im Sommer 1978 den Zweiten und im Herbst 1979
den Dritten Abschnitt der Ärztlichen Prüfung mit Er-
folg ab.

Anfang nächsten Jahres werde ich zum Grundwehrdienst
zur Bundeswehr eingezogen.

Coburg, im November 1979

